

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## **DIAGNOSTIKA OTEPLENÍ VYBRANÝCH ČÁSTÍ ELEKTRICKÉHO STROJE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

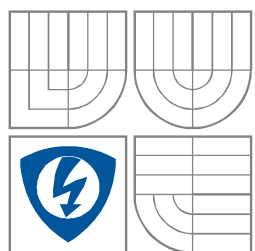
Martin Prezbruchý

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
ENGINEERING

## **DIAGNOSTIKA OTEPLENÍ VYBRANÝCH ČÁSTÍ ELEKTRICKÉHO STROJE**

DIAGNOSIS WARMING SELECTED PARTS OF AN ELECTRIC MACHINE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Martin Prezbruchý

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. František Veselka, CSc.

BRNO, 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Prezbruchý Martin

**Ročník:** 3

**ID:** 102403

**Akademický rok:** 2010/2011

**NÁZEV TÉMATU:**

## Diagnostika oteplení vybraných částí elektrického stroje

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s problematikou měření teploty na elektrických strojích
2. Navrhněte a sestavte měřicí sestavu pro měření teploty na zvolených částech zadaného elektrického stroje
3. Vytvořte teplotní model elektrického stroje
4. Zhodnoťte výsledky měření a zároveň i použitou měřicí metodu

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

**Termín zadání:** 23.9.2010

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí projektu:** doc. Ing. František Veselka, CSc.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## Abstrakt

Táto práca sa snaží popisovať oteplenie vybraných častí elektrického stroja. V prvej časti, sa práca zaoberá teplom a teplotou, jeho vznikom a šírením. Práca pokračuje problematikou vzniku tepla v elektrických strojoch a na vybraných častiach elektromotora. V ďalšej časti práca popisuje meranie a rozdeľuje ho na bezdotykové a dotykové. Tretia časť práce pojednáva o elektrických strojov a zaoberá sa komutátorovými strojmi. Nasleduje praktická časť práce, ktorá popisuje merania na zadanom elektrickom stroji, obsahuje výpočty a grafy. Po tejto časti sa práca venuje rozloženiu teploty v grafickom rozhraní a popisuje tvorbu 3D modelu. V závere sa snaží zhodnotiť výsledky merania a porovnanie výsledkov rôznymi metódami.

## Abstract

This work is describing warming parts of an electric machine. In the first part, it is describing heat and temperature, its origin and radiation. Work is carrying on with the problems of heat origin in electric machines and in selected parts of an it. In the next part, the work is describing measurment and devides it in contact and contactless. The third part is dealing with electric machines and considers commutator motors. Work continues with practical part, which describes measurments on selected electric machine, includes calculations and graphs. After this part, work is dealing with temperature allocation in graphic interface and describes a 3D model production. In the conclusion, it is evaluating the measurment achievements and comparing the results of various used metods.

## Kľúčové slová

teplota; oteplenie; rozloženie teploty; elektrický motor; guľčkové ložisko; hybridné ložisko; komutátorový motor; termočlánok; termokamera

## Keywords

temperature; warming; temperature allocation; electric machine; ball bearing; hybrid bearing; commutator motor; thermocouple; thermocamera

## Bibliografická citácia

Bibliografická citácia – Prezbruchý, M. *Diagnostika oteplení vybraných částí elektrického stroje*, Brno: FEKT VUT v Brně, 2011. 58 s.

## Prehlásenie

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Diagnostika oteplení vybraných částí elektrického stroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

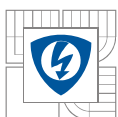
Podpis autora .....

## Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Františkovi Veselkovi, CSc za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Taktiež ďakujem Ing. Karolovi Sutorisovi zo závodu BSH, za sprostredkovanie motorov pre bakalársku prácu a p. Zdeňkovi Liškovi za cennú technickú pomoc v laboratóriách.

V Brně dne .....

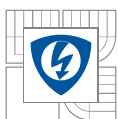
Podpis autora .....



## Obsah

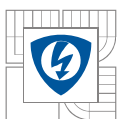
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 TEPLA A TEPLOTA .....</b>	<b>12</b>
2.1 DEFINÍCIA .....	12
2.2 VZNIK TEPLA .....	13
2.3 ŠÍRENIE TEPLA .....	13
2.4 VZNIK TEPLA V TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJOCH .....	13
2.5 VZNIK TEPLA STRATAMI .....	14
2.6 VZNIK TEPLA VO VYBRANÝCH ČASTIACH MOTORA - STATOR .....	15
2.7 VZNIK TEPLA VO VYBRANÝCH ČASTIACH MOTORA - GULÍČKOVÉ LOŽISKO .....	16
2.8 VZNIK TEPLA VO VYBRANÝCH ČASTIACH MOTORA - HYBRIDNÉ LOŽISKO .....	17
<b>3 MERANIE .....</b>	<b>18</b>
3.1 MERANIE TEPLoty .....	18
3.2 PRINCÍPY MERANIA TEPLoty .....	19
3.3 ROZDELENIE SENZOROV TEPLoty .....	19
3.4 DOTYKOVÉ MERANIE TEPLoty .....	19
3.4.1 ODPOROVÉ KOVOVÉ SENZORY TEPLoty .....	20
3.4.2 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty .....	20
3.4.3 TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE TEPLoty – TERMOČLÁNKY .....	20
3.5 BEZDOTYKOVÉ MERANIE TEPLoty – PYROMETRIA .....	21
3.5.1 ZÁKLADNÉ PARAMETRE SENZOROV ŽIARENIA .....	22
3.5.2 ZÁKLADY PYROMETRIE .....	22
3.5.3 PYROMETRE .....	23
3.5.4 TERMovÍZNE PRÍSTROJE .....	23
<b>4 ELEKTRICKÉ STROJE .....</b>	<b>24</b>
4.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTRICKÝCH STROJOV .....	24
4.2 KOMUTÁTOROVÉ MOTORY .....	24
4.2.1 JEDNOFÁZOVÝ SÉRIOVÝ KOMUTÁTOROVÝ MOTOR .....	25
4.3 ZAŤAŽOVANIE ELEKTRICKÉHO STROJA .....	26
4.4 OTEPLENIE ELEKTRICKÝCH STROJOV .....	27
4.4.1 VÝPOČET OTEPLENIA .....	30
<b>5 MERANIE OTEPLENIA V LABORATÓRIU - PRAKTICKÁ ČASŤ .....</b>	<b>31</b>
5.1 MERANIE V LABORATÓRIU .....	31
5.2 PROGRAM MERANIA OTEPLENIA VYBRANÝCH ČASTÍ STROJA .....	34
5.2.1 MERANIE Č. 1 .....	34
5.2.2 MERANIE Č. 2 .....	40
<b>6 MODELOVANIE ZADANÉHO ELEKTRICKÉHO PRÍSTROJA .....</b>	<b>44</b>
<b>7 ROZLOŽENIE TEPLoty ELEKTRICKÉHO PRÍSTROJA PROGRAMOM ANSYS V.12 .....</b>	<b>45</b>
<b>8 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA VŠETKÝMI METÓDAMI .....</b>	<b>47</b>





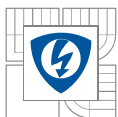
## Zoznam obrázkov

<b>Obr. 1</b> - Hlavné časti guľíkového ložiska.....	16
<b>Obr. 2</b> - Peltierov článok.....	21
<b>Obr. 3</b> - Termovízia s opticko-mechanickým rozkladom obrazu.....	24
<b>Obr. 4</b> - Komutácia v jednej cievke komut. stroja na str. prúd.....	25
<b>Obr. 5</b> - Magentický obvod univerzálneho motorčeka.....	25
<b>Obr. 6</b> - Momentová charakteristika univerzálneho motoru a regulácia otáčok motoru.....	26
<b>Obr. 7</b> - Graf oteplenia vodiča v elektrickom stroji.....	28
<b>Obr. 8</b> – Schéma zapojenia motoru.....	32
<b>Obr. 9</b> - Fotografia pripojenia motoru na dynamometer.....	32
<b>Obr. 10</b> - Fotografia použitých prístrojov.....	33
<b>Obr. 11</b> - Fotografia motora s vyznačením meraných bodov.....	34
<b>Obr. 12</b> - Otepľovacia krivka ložiska pri použití prístroja Testo 900.....	36
<b>Obr. 13</b> - Otepľovacia krivka statorového zväzku pri použití prístroja Testo 900.....	37
<b>Obr. 14</b> - Otepľovacie krivky merania č.1.....	37
<b>Obr. 15</b> - Snímok z termokamery v čase 9:30.....	38
<b>Obr. 16</b> - Snímok z termokamery v čase 10:30.....	38
<b>Obr. 17</b> - Snímok z termokamery v čase 12:00.....	39
<b>Obr. 18</b> - Otepľovacia krivka ložiskového štítu pri použití prístroja Testo 900, meranie č. 2.....	41
<b>Obr. 19</b> - Otepľovacia krivka statorového zväzku pri použití prístroja Testo 900, meranie č.2...	42
<b>Obr. 20</b> - Otepľovacie krivky, meranie č.2.....	42
<b>Obr. 21</b> - Snímok z termokamery v čase 8:20.....	42
<b>Obr. 22</b> - Snímok z termokamery v čase 9:20.....	43
<b>Obr. 23</b> - Snímok z termokamery v čase 10:50.....	43
<b>Obr.24</b> – Namodelovaný motor Muster v Inventore 2009.....	45
<b>Obr. 25</b> – Celkový Mesh motoru Muster.....	46
<b>Obr. 26</b> – Teplotný model elektrického stroja.....	46
<b>Obr. 27</b> – Porovnanie oteplenia ložiskového štítu pri použití rozličných ložísk.....	49



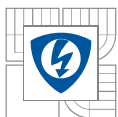
## Zoznam tabuliek

<b>Tab.1</b> - <i>Dovolené oteplenia motoru.....</i>	<i>14</i>
<b>Tab. 2</b> - <i>Rozdelenie termočlánkov podľa noriem IEC A DIN.....</i>	<i>21</i>
<b>Tab. 3</b> - <i>Hodnoty emisivity pre rôzne druhy materiálov.....</i>	<i>22</i>
<b>Tab. 4</b> - <i>Štítkové hodnoty motora.....</i>	<i>32</i>
<b>Tab. 5</b> - <i>Použité prístroje.....</i>	<i>33</i>
<b>Tab. 6</b> - <i>Zaznamenané hodnoty z merania č. 1.....</i>	<i>36</i>
<b>Tab. 7</b> - <i>Zaznamenané hodnoty z merania č. 2.....</i>	<i>41</i>



## Zoznam skratiek a symbolov

$\eta$  – účinnosť Carnotovho cyklu  
 $Q_2$  – teplo odobrané teplomernou látkou z kúpeľa s teplotou  $T_2$   
 $Q_3$  – teplo odovzdané teplomernou látkou do kúpeľa s teplotou  $T_1$   
 $T_1$  – teplota 1  
 $T_2$  – teplota 2  
 $t$  – neznáma teplota  
 $a_i$  – príslušné koeficienty, odvodené pre daný typ termočlánku  
 $U_{te}$  – termoelektrické napätie, namerané na termočlánku  
 $n$  – rád polynómu  
 $E$  – hustota žiarivého toku  
 $\varepsilon$  – emisivita  
 $z$  – zaťaženie  
 $t_c$  – doba cyklu  
 $\eta_w$  – energetická účinnosť  
 $\Delta W$  – celkové straty v danej sústave pohonu  
 $W_1$  – vstupujúca energia  
 $W_2$  – vystupujúca energia  
 $\Delta P$  – celkové straty  
 $R$  – ohmický odpor  
 $I$  – pretekajúci prúd  
 $\Delta P_j$  – Stray vo vinutí  
 $\Delta P_f$  – straty na budiacom vinutí  
 $\Delta P_{kl}$  – straty na komutátore a zberacích krúžkoch  
 $\Delta P_{mech,t}$  – mechanické straty: trením  
 $\Delta P_{mech,v}$  – ventilačné straty  
 $\Delta P_{Fe,v}$  – vírivé straty  
 $\Delta P_{Fe,h}$  – hysterézne straty  
 $P_{Fe}$  – celkové približné straty  
 $\tau$  – časová konštanta  
 $\Delta P_{dt}$  – straty motoru  
 $C$  – tepelná kapacita motoru ( $J \cdot K^{-1}$ )  
 $A$  – súčiniteľ prestupu tepla do chladiva ( $W \cdot K^{-1}$ )  
 $\Delta \vartheta$  – oteplenie ( $K$ )  
 $\Delta \vartheta_{max}$  – maximálne oteplenie  
 $A$  – ampérmeter  
 $V$  – voltmeter  
 $M$  – Motor  
 $D$  – dynamometer  
 $e$  – základ prirodzených logaritmov



# 1 ÚVOD

Zmyslom tejto bakalárskej práce je zistenie oteplenia na vybraných častiach na zadanom elektrickom prístroji. Problematiku tepla najskôr rozoberiem teoretickým úvodom, v ktorom popíšem čo to vlastne teplota je, ako sa meria, ako prakticky vzniká a ako sa šíri. Ďalej sa budem venovať vybraným častiam elektrického stroja, popíšem rozličné časti a rozoberiem vznik tepla na týchto častiach.

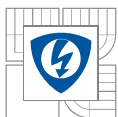
V druhej časti budem popisovať meranie teploty a jeho princípy, rozdelenie snímačov teploty. Snímače ďalej rozdelím na dotykové a bezdotykové a v každom popise uvediem základné vlastnosti snímačov, použitie a charakteristiku. V tejto časti práce sa taktiež budem venovať termovíznym prístrojom.

Tretia časť práce sa venuje elektrickým strojom, kde sa budem zaoberať komutátorovými motormi, popisu a ich základným charakteristikám. Je to práve komutátorový motor, ktorý budem používať v praktikej časti bakalárskej práce. Ďalšie časti popisujú oteplenie elektrických strojov, výpočty oteplenia a zaťažovanie elektrického stroja.

Praktické merania sú tématickou ďalšej časti práce. V tejto časti práce budem popisovať merania v laboratóriu elektrických strojov Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií v Brne. Popíšem použité prístroje, dve merania a zapojenie elektrického stroja v meracom obvode. Táto časť bude obsahovať vykreslené grafy, výpočty a vyhodnotenie oboch meraní.

Ďalším bodom práce bude modelovanie elektrického stroja v grafickom rozhraní počítača. Uvediem postup modelovania a použitý software pri výrobe modelu. Zoznámim čitateľa s programom Autodesk Inventor a Ansys Workbench. Výsledkom tejto časti bude obrázok teplotného modelu zadaného elektrického stroja s zobrazenou teplotnou škálou pre jednoduché porovnanie oteplenia jednotlivých častí stroja.

V neposlednej rade zhrniem výsledky všetkými použitými metódami. Budem sa venovať a porovnávať výsledky merania v laboratóriu so všetkými použitými prístrojmi. Táto časť bude taktiež zohľadňovať ekonomické hľadisko pri použití hybridného ložiska v druhom meraní.



## 2 TEPLO A TEPLOTA

### 2.1 Definícia

Teplota je termodynamická stavová veličina, ktorá opisuje strednú kinetickú energiu častíc. Definuje sa na základe účinnosti vratného Carnotovho cyklu. Účinnosť vratného Carnotovho cyklu, pracujúceho medzi rovnakými kúpeľmi s určitými teplotami, závisí len od týchto teplôt a nezávisí od použitej teplomernej látky. Platí vzťah:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1.1)$$

kde;  $\eta$  je účinnosť Carnotovho cyklu

$Q_2$  je teplo odobrané teplomernou látkou z kúpeľa s teplotou  $T_2$

$Q_1$  je teplo odovzdané teplomernou látkou do kúpeľa s teplotou  $T_1$

V prípade ideálneho Carnotovho cyklu ( $\eta = 1$ ) zo vzťahu vyplýva <sup>1</sup>

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1.2)$$

Ako sa píše v knihe *Senzory a měřící obvody*, ideálny tepelný stroj pracujúci na princípe Carnotovho cyklu sa nedá zostrojiť. Teplomernou látkou však môže byť tiež dokonalý plyn, pre ktorý platí v súlade s Carnotovým cyklom termodynamická rovnica:

$$p \cdot V = R_m \cdot T \quad (1.3)$$

kde;  $R_m$  je molárna plynová konštanta

$V$  je objem plynu

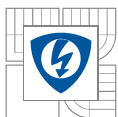
$T$  je teplota plynu <sup>2</sup>

Základnou jednotkou teploty je Kelvin [K] definovaný ako 273,26-tá časť termodynamickej teploty trojného bodu vody. Jednotkou teploty je taktiež stupeň Celsia [°C] definovaný vzťahom

$$\vartheta = T - T_0 \quad (1.4)$$

kde;  $T_0$  273,15 K <sup>3</sup>

Trojný bod je bod vo fázorovom diagrame, ktorý udáva teplotu a tlak, pri ktorých sa nachádzajú skupenstvá pevné, kvapalné a plynné v rovnovážnom stave. Pre vodu táto rovnováha nastáva pri tlaku 610,6 Pa a teplote 0,01°C. Táto teplota odpovedá hodnote 273,16 kelvinov. <sup>4</sup>



## 2.2 Vznik tepla

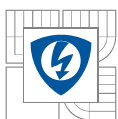
Teplo je forma energie, ktorá vzniká napr. premenou elektrickej energie. Vzniká viacerými spôsobmi, z ktorých najdôležitejšími sú: a, *priebeh elektrického prúdu ohmickým odporom* (napríklad pretekánie elektrického prúdu vodičmi, nedokonalé spojenie vodičov v spojoch, poddimenzovaním vodičov, vyšším odberom prúdu z batérie a pod.) . b, *elektrickým oblúkom* (napríklad premenou elektrického prúdu na svetlo, zváraním, pri spínaní elektrookého obvodu). c, *elektrickou indukciou* (napríklad striedavý prúd sa indukuje – motory, transformátory, generátory, dynamo). d, *vysokofrekvenčným ohrevom* (vznik tepla priechodom prúdu v izolačných materiáloch). e, *infračerveným žiarením* (ohrev vzduchu infračerveným žiaričom). Najväčšie teplo vzniká pri poruchových stavoch, takzvaných skratoch. Teplo vzniká na ohmickom odpore priamým spojením živých častí elektrického zariadenia, alebo porušením izolácie. Dôsledky vzniku tepla môžu byť zanedbateľné, ale častokrát dochádza k prehriatiu elektrického zariadenia a následne jeho zlyhaniu, alebo dokonca ku vzniku požiaru. Preto je nezbytnou súčasťou prevádzky elektrického prístroja jeho monitorovanie a meranie teplôt. <sup>5</sup>

## 2.3 Šírenie tepla

Spôsobov šírenia tepla môže byť v reálnej praxi viac. Jedným z nich je *vedenie (kondukcia) tepla*, kedy si energiu vymieňajú len priamo spolu susediace častice látky. Ďalším spôsobom šírenia tepla je *prúdenie (konvekcija)*, ku ktorému dochádza vtedy, keď častice látky menia v priestore svoju polohu vo väčšom merítke, pričom unášajú svoju energiu so sebou. Tento dej nastáva v prúdiacich kvapalinách a plynch. Tretím spôsobom šírenia tepla je tzv. *teplotné žiarenie alebo sálanie*. Prenos energie žiarením medzi dvoma telesami prebieha aj keď sú telesá vo vákuu, alebo teplota prostredia medzi nimi je podstatne nižšia alebo vyššia, než je teplota obidvoch telies (napr. výmena tepelnej energie medzi Slnkom a Zemou). Teplotné žiarenia je rovnakej povahy ako žiarenie svetelné a patrí do skupiny fyzikálnych javov, ktoré nazývame elektromagnetickým žiarením. <sup>6</sup>

## 2.4 Vznik tepla v točivých elektrických strojoch

Z tepelného hľadiska predstavuje elektromotor nehomogénne teleso s rôznou tepelnou vodivosťou použitých materiálov. Zdrojov tepla v točivom elektrickom stroji je viacero, no prevažne sú to časti, ktorými prechádza elektrický prúd, alebo časti v ktorých vznikajú straty v železe a mechanické straty. Tieto straty nie sú v elektrickom stroji rozložené rovnomerne. Teplota a oteplenie motora je veľmi dôležitá z hľadiska dimenzovania motora. Typovú veľkosť motora určujeme z podmienky prevádzkového a dovoleného oteplenia motora, ktorého hodnota je daná tepelnou triedou použitej izolácie vinutia. Výrobca garantuje, že izolácia vinutia bude mať zaručenú životnosť, pokiaľ neprestúpi oteplenie motora hodnoty, ktoré podrobne určuje norma ČSN 350 000. Po prekročení hodnôt udaných v tabuľke 1, izolácia stárne a jej životnosť sa skraca. Ako hovorí norma, tepelná trieda izolačných materiálov je medzinárodne platná klasifikačná stupnica izolačných materiálov podľa ich tepelnej odolnosti (tj. najvyššia teplota, ktorú izolačný materiál znesie, pri ktorom nedôjde k jeho vnútorným chemickým zmenám. <sup>7</sup>



Teplotná trieda	Oteplenie statoru	Oteplenie rotoru
A	60°C-65°C	60°C
E	75°C	75°C
B	80°C-85°C	80°C
F	100°C-110°C	105°C
H	125°C-130°C	125°C

**Tab.1** – dovolené oteplenia motoru

## 2.5 Vznik tepla stratami

Pojem straty a stratová energia zahrňuje všeobecne rozdiel medzi vstupujúcou energiou a energiou na výstupe zariadenia. Energetická účinnosť je pomer výstupnej energie k energii odoberanej na vstupe. Vypočítame ju:

$$\eta_w = \frac{W_2}{W_1} = \frac{W_2}{W_2 + \Delta W} = \frac{W_1 - \Delta W}{W_1} \quad (1.5)$$

kde;  $\Delta W$  sú celkové straty v danej sústave pohonu.

Počas práce elektrického pohonu vznikajú v jeho jednotlivých častiach straty, ktoré sa menia na teplo. Vznikajú prúdom, ktorý prechádza vinutím elektrického stroja, výrivyami prúdmi a hysteréziou v magnetických obvodoch. Straty a stratové teplo vznikajúce v elektrickom stroji závisí od jeho zaťaženia. Straty môžeme rozdeliť na:

- *Straty závislé na zaťažení* - tieto straty sú závislé na ohmických odporoch vinutí elektrických strojov a sú úmerné štvorcu zaťažovacieho prúdu:

$$\Delta P = RI^2 \quad (1.6)$$

Jedná sa väčšinou o straty vo vinutí kotvy a pomocných pólov cudzobudených jednosmerných strojov, vrátane strát vo vinutí asynchrónnych motorov, transformátorov, v kotve synchrónnych strojov, tlmiviek a podobne.

*Konštantné straty:*

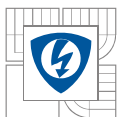
- *Straty vo vinutí  $\Delta P_j$ :* u točivých elektrických strojoch tvoria až 35 – 60% celkových strát. Počítajú sa z prúdov zistených z kruhového diagramu.

$$\Delta P_{j1} = m_1 R_1 I_1^2 \quad (1.7)$$

$$\Delta P_{j2} = m_1 R_{21} I_{21}^2 \quad (1.8)$$

- *Straty na budiacom vinutí  $\Delta P_f$ :* tvoria menšiu časť strát – 6-15% a u synchrónnych motoroch ich považujeme za konštantné.

- *Straty na komutátore a zberacích krúžkoch  $\Delta P_{kl}$ :* u synchrónnych a asynchrónnych strojoch tvoria 4-6% celkových strát.



• *Mechanické straty:* trením ( $\Delta P_m$ ) - Keďže je elektrický pohon točivý stroj, obsahuje časti v ktorých nastáva trenie. Rotor motoru obsahuje klzné ložiská, v ktorých nastáva teplo a so zvyšujúcimi otáčkami motora sa toto teplo zvyšuje. Dnešné motory majú ložiská s trvalou náplňou maziva, takže by teoreticky nebolo potrebné po celú dobu životnosti motora, ložiská domazávať. Skutočnosť je ale iná, a ak chceme teplo vzniknuté v tejto časti motora znížiť, je potrebné časom staré mazivo vymyť a nahradiť novým, alebo hlučné problémové ložisko vymeniť. Ventilačné straty ( $\Delta P_{mech,v}$ )

• *Straty v magnetickom obvode:* vírivé ( $\Delta P_{Fe,v}$ ): vírivý prúd je elektrický prúd vznikajúci v plošných alebo objemových vodičoch, keď sa v ich okolo mení magnetický indukčný tok. Indukované prúdy majú v tomto prípade charakter prúdových slučiek. Straty vzniknuté vírivými prúdmi sú závislé na frekvencii a môžeme ich vyjadriť vzťahom:

$$P_v \approx f^2 \cdot B^2 \quad (1.9)$$

Tieto straty môžeme obmedziť napríklad použitím navzájom izolovaných plechov, použitím materiálu s veľkým odporom alebo znížením indukovaného napätia.<sup>8</sup>

hysterézne ( $\Delta P_{Fe,h}$ ): predstavujú energiu spotrebovanú na jeden magnetizačný cyklus, ktorá je úmerná ploche hysteréznej slučky. Hysterézna slučka magnetického materiálu je uzatvorená krivka, ktorá vyjadruje závislosť  $B = f(H)$  pri pomalej, plynulej zmene intenzity magnetického poľa od  $+H_s$  do  $-H_s$ .

celkové približné ( $P_{Fe}$ )

• *Straty v meničoch:* straty v prúdových obvodoch, straty v polovodičových súčiastkach, straty konštantné v riadiacich a pomocných obvodov a straty komutačné.

• *Dodatočné straty*  $\Delta P_d$ , ktoré zahrňujú:

a) *dodatočné straty v železe* (opracovanie, pole masívnych konštrukčných častí)

b) *dodatočné straty vo vodičoch* (zvýšenie prúdovej hustoty pôsobením rozptylového toku)<sup>9</sup>

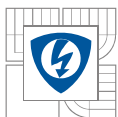
**Celkové straty motora sú:**

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_d \quad (2.0)$$

## 2.6 Vznik tepla vo vybraných častiach motora - stator

V tejto práci sa budem zaoberať konkrétne dvoma vybranými časťami motora, na ktorých budeme sledovať oteplenie. Prvou časťou elektrického stroja je *statorový zväzok*. Stator je nepohyblivá časť elektrického stroja, ktorá tvorí časť magnetického obvodu. V statore je uložené vinutie stroja. U jednosmerných strojoch sa stator skladá z magnetických pólov, ktoré sú zložené z plechov prišrúbovaných ku kostre a uzatvárajú magnetický obvod. U striedavých strojov je stator zložený z plechov s drážkami pre vinutie.





V prípade komutátorového stroja je stator tvorený permanentným magnetom a rotujúcou kotvou vo forme elektromagnetu s dvoma pólmi. Sériový komutátorový stroj má namiesto permanentného magnetu využitý pre stator elektromagnet. Ak je vinutie statoru spojené s vinutím rotoru do série, hovoríme práve o sériovom elektromotore.<sup>10</sup>

Pri priechoode elektrického prúdu vo vodiči vzniká teplo. Hovoríme o stratách vo vinutí a vypočítame ich:

$$\Delta P_{Cu1} = m R_{1/75} I_1^2 \quad (2.1)$$

## 2.7 Vznik tepla vo vybraných častiach motora - guľčkové ložisko

Druhou vybranou časťou elektrického stroja je *ložisko*. Ložisko je zariadenie, ktoré umožňuje prenos sily pri vzájomnom otáčavom alebo posuvnom pohybe jeho dielov.

Základné rozdelenie ložísk je:

**Podľa druhu pohybu:**

- a) rotačné
- b) lineárne

**Podľa smeru prenášanej sily:**

- a) axiálne (sily pôsobia v smere otáčania osy)
- b) radiálne (sily pôsobia kolmo na osu otáčania)

**Podľa princípu:**

1. klzné:

- a) pneumatické
- b) hydraulické

2. valivé:

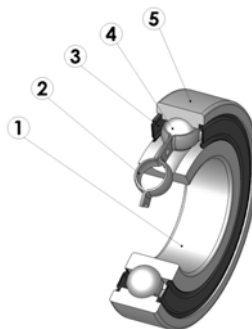
- a) guľčkové
- b) ihlové
- c) váľčkové
- d) súdočkové
- e) kuželníkové

3. magnetické:

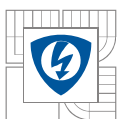
- a) aktívne
- b) pasívne

Najrozšírenejším druhom valivého ložiska je radiálne guľčkové ložisko, ktoré umožňuje prenášať radiálne a axiálne sily. Pozostáva z (obr.1):

- 1. vnútorný kruh
- 2. klientka
- 3. tesnenie
- 4. guľčky
- 5. vonkajší krúžok



**Obr. 1 - Hlavné časti guľčkového ložiska**



Každá z týchto častí ložiska je pre správnu funkciu nesmierne dôležitá. Vnútorný kruh sa nasadzuje na hriadeľ motoru. Klietka udržiava guľičky pohromade a tesnenie utesňuje priestor medzi vonkajším a vnútorným priestorom. Guľičky v ložisku prenášajú točivý pohyb a sú valivým elementom. Vonkajší krúžok sa nasadzuje do kostry motora. Ich konštrukcia je spravidla veľmi jednoduchá, nerozoberateľná a dovoľuje ložisku pracovať aj vo veľmi vysokých otáčkach. Guľčkové ložisko sa vyrába v mnoho prevedeniach a širokej škále prevedení.<sup>11</sup>

V ložiskárskom priemysle sa vyskytuje niekoľko dôležitých pojmov ktoré opisujú vlastnosti ložiska. Jeden z najväčších výrobcov ložísk v Českej republike, závod ZKL (Závody kuličkových ložísek), popisuje medzi základnými výpočtami o ložisku *dynamickú únosnosť*. Jedná sa o stále nepremenné zaťaženie, ktoré môže ložisko teoreticky prenášať pri základnej trvanlivosti jeden milión otáčok. K ďalším základným výpočtom patrí *trvanlivosť* ložiska. Výrobca ju popisuje ako počet otáčok, ktorí vykoná jeden krúžok vzhľadom k druhému krúžku, pokiaľ sa neobjaví prvý príznak unavy materiálu na jednom krúžku alebo celom valivom telese. Ako ďalšie výpočty ložiska výrobca uvádza *ekvivalentné dynamické zaťaženie* a *vplyv teploty na ložisko*. Väčšina ložísk na trhu sú vyrábané pre použitie v prostredí s teplotou do 120°C. Výnimku tvoria dvojradé súdečkové ložiská ktoré môžu pracovať až do teploty 200°C.<sup>12</sup>

Pri otáčaní elektrického stroja dochádza ku rotácii guľčiek vo vnútri ložiska. Pri dotyku plochy guľčiky s plochou vnútorného a vonkajšieho kruhu vzniká trenie. Trenie sa označuje ako jav, ktorý vzniká pri pohybe telesa. Pri trení existuje tzv. trecia sila, ktorá pôsobí proti pohybujúcemu sa telesu. Práca, ktorá je potrebná k prekonaniu trecej sily, sa prevažne mení v teplo.

Trecia sila pri trení má veľkosť: 
$$F_t = f \cdot F_n \quad (2.2)$$

kde;  $f$  je súčiniteľ šmykového trenia

$F_n$  je kolmá tlaková sila medzi telesami

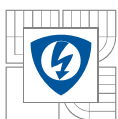
V prípade guľčkového ložiska, je materiál ložiska a kruhov oceľ. Súčiniteľ šmykového trenia podľa tabulkovej hodnoty nadobúda hodnotu 0,15 [-]

Trenie má zásadný vplyv na vzniku tepla a prevádzkovej teploty ložiska. Celkový odpor proti otáčaniu sa skladá z valivého a šmykového trenia v mieste valivého kontaktu, v mieste styku medzi valivými telesami a klietkou, z trenia v mazive, ako aj na vodiacich plochách pre valivé telesá alebo klietku.<sup>13</sup>

## 2.8 Vznik tepla vo vybraných častiach motora - hybridné ložisko

Hybridné ložiská majú krúžky z ložiskovej ocele a valivé telesá z nitridu kremíka ložiskovej kvality ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Tieto ložiská sa vyznačujú nielen výbornými elektroizolačnými vlastnosťami, ale môžu navyše pracovať pri vyšších otáčkach, pričom dosahujú vo väčšine aplikácií aj dlhšiu prevádzkovú trvanlivosť ako oceľové ložiská.<sup>14</sup>

Nitrid kremíka je veľmi tvrdý a odolný materiál, ktorý sa dá opracovať do akéhokoľvek tvaru. Jeho vlastnosti sú študované viac ako tri desaťročia. Medzi jeho najzákladnejšie vlastnosti



patria: pevnosť, nízky koeficient teplotnej rozťažnosti, nízka hustota a tým aj nižšia hmotnosť. Nízky koeficient tepelnej rozťažnosti znamená, že je ložisko menej citlivé na teplotné zmeny.

Práve jeho veľmi dobré elektroizolačné vlastnosti predstavujú jednu z najdôležitejších vlastností. Týmto spôsobom je zaistená ochrana krúžkov proti poškodeniu elektrickým prúdom a tým je dosiahnuté predĺženie prevádzkovej trvanlivosti ložisiek. Klieťka je menej namáhaná pri rýchlom rozbehu a zastavení a pri vysokých otáčkach je trenie podstatne nižšie. Nižšie trenie sa prejavuje nižšou prevádzkovou teplotou a dlhšou životnosťou maziva.<sup>15</sup>

### 3 MERANIE

Meranie je neoddeliteľnou súčasťou vedy, techniky i mnohých ďalších oblastí ľudskej činnosti. Poskytuje informácie nevyhnutné pre normálny chod výrobných i nevýrobných odvetví hospodárstva každého technicky vyspelého štátu, pre riadenie strojov a optimalizáciu procesov, ako aj pre porovnávanie vlastností výrobkov a hodnotenie ich kvality. Je nevyhnutnou podmienkou technického rozvoja a medzinárodnej spolupráce.

#### 3.1 Meranie teploty

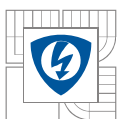
Meranie teploty patrí k najzákladnejším fyzikálnym meraniam. V oblasti merania teploty zaznamenal veľký pokrok vynález skleného teplomera, ktorý v roku 1592 skonštruoval Galileo Galilei. Bola to sklenená guľa, v spodnej časti predĺžená do rúrkovitého tvaru a otvorená, pričom spodný otvor bol kolmo ponorený do vody. Pri ochladení vzduchu v guli vodný stĺpec v rúrke stúpil nahor. Tento teplomer nebol dostatočne vhodný na meranie teploty, pretože nameraná hodnota závisela aj od atmosférického tlaku. Okrem toho nebola ešte známa teplotná stupnica, takže ukazoval len rozdiel teplôt. Na tento teplomer nadviazali ďalší vynálezcovia, ktorí vytvorili rúrkovité teplomery s uzavretými koncami, ktoré využívali tepelnú rozťažnosť kvapalín (etylalkoholu alebo ortute).

Zariadenia na meranie teploty sa nazývajú teplomery. Všeobecne využívajú rôzne meracie princípy a existujú v množstve konštrukčných vyhotovení. Podľa umiestnenia snímačnej časti v meranom prostredí sa delia do dvoch skupín na *dotykové* a *bezdotykové*. Dotykové teplomery majú snímaciu časť umiestnenú priamo v meranom prostredí, resp. dotýkajú sa meraného objektu. Bezdotykové teplomery merajú teplotu na diaľku, teda majú snímaciu časť umiestnenú mimo meraného prostredia, resp. sa nedotýkajú meraného objektu.<sup>16</sup>

K meraniu teploty v dennej praxi používame najčastejšie v Celsiovej teplotnej stupnici. K zostrojeniu stupnice volíme dva základné vzťahy:

1. rovnovážny stav chemicky čistej vody a jej ľadu za normálneho tlaku. Tomuto stavu priradíme dohodou teplotu 0°C.
2. rovnovážny stav chemicky čistej vody a jej sytej pary za normálneho tlaku. Tomuto stavu priradíme dohodou teplotu 100°C.

Ak rozdelíme teplotnú stupnicu medzi týmito základnými teplotami na 100 rovnakých dielkov, odpovedá jeden diel teplotnému rozdielu jedného Celsiovho stupňa. (°C)<sup>17</sup>



### 3.2 Princípy merania teploty

Vo všeobecnosti meradlá teploty využívajú niekoľko základných princípov:

1) *teplotnú rozťažnosť* tuhých, kvapalných alebo plyných teplomerných látok. Teplotná rozťažnosť teplomernej látky, resp. rozdiel teplotných rozťažností dvoch látok potom predstavuje mieru teploty.

Meria sa zmena objemu teplomernej látky pri konštantnom tlaku (dilatačné teplomery), alebo zmena tlaku teplomernej látky pri konštantnom objeme (tlakové teplomery)

2) *zmenu elektrických vlastností* snímača v závislosti od zmeny teploty. Využíva sa:

a) závislosť elektrického odporu vodičov alebo polovodičov od teploty. Takéto snímače teploty sa nazývajú odporové teplomery, resp. termistory,

b) vznik termoelektrického napätia v obvode tvorenom dvoma rôznymi kovovými vodičmi, ktorých konce sú spojené a vystavujú sa dvom rôznym teplotám (Seebeckov jav). Takéto snímače teploty sa nazývajú termočlánky,

3) snímanie *celkovej energie žiarenia*. Tuhé a kvapalné látky vysielajú pri každej teplote  $T > 0 \text{ K}$  tepelné žiarenie. Na určenie teploty sa využíva tepelná závislosť žiary, ktorú merajú tepelné detektory,

4) využitie *spektrálnej žiarivosti* meraného objektu. S rastom teploty meraného objektu rastie aj jeho spektrálna žiarivosť.<sup>18</sup>

### 3.3 Rozdelenie senzorov teploty

Senzory pre dotykové meranie teploty:

a) elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN prechodom, termoelektrické, kryštálové)

b) dilatačné (kvapalinové, plynové, parné a bimetalové)

c) špeciálne (akustické, šumové, magnetické, tekuté kryštály)

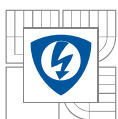
Senzory pre bezdotykové meranie teploty:

a) tepelné

b) kvantové<sup>19</sup>

### 3.4 Dotykové meranie teploty

Cez rastúci význam bezdotykového merania teploty na bázi tepelného žiarenia, je teplota v priemysle meraná dotykovými metódami. Medzi najstaršie typy kontaktného merania patria ortuťové alebo kovové teplomery. Z nich najpoužívanejšími sú dilatačné teplomery, ktoré využívajú princíp objemovej rozťažnosti plyných, kvapalných alebo tuhých teplomerných látok pri konštantnom tlaku, kvapalinové teplomery, ktoré patria podľa konštrukcie ako i spôsobu merania medzi najjednoduchšie teplomery a nachádzajú široké uplatnenie v praxi. Pri svojej



činnosti využívajú objemovú rozťažnosť kvapalín. Ďalšími druhmi teplomerov sú: kovový, bimetalový, plynový a tlakový. V dnešnej pokročilej dobe sa prevažne uplatňujú meracie reťazce zostavené zo snímača, prevodníka a vyhodnocovacej jednotky. Meranie teploty tu zaisťuje snímač, ktorého signál sa v prevodníku zosiluje, upravuje a väčšinou digitalizuje a vyhodnocovacia jednotka ho vo vhodnom tvare zobrazuje a dokumentuje. Medzi najpoužívanejšie prístroje pri dotykovom meraní patria: odporové teplomery, termoelektrické senzory: termočlánky, termistory, meracie sondy.<sup>20</sup>

### 3.4.1 Odporové kovové senzory teploty

Princípom odporových kovových teplomerov je teplotná závislosť odporu kovu na teplote. Kov si môžeme predstaviť ako súbor kladných iónov umiestnených v mriežkových bodoch kryštálovej mriežky a tzv. elektrónového plynu tvoreného súborom chaoticky sa pohybujúcich elektrónov. Pre prevádzkové kovové teplomery môžeme v rozsahu teplôt 0°C až 100°C použiť vzťah:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \vartheta) \quad (2.3)$$

kde;  $\alpha$  je teplotný súčiniteľ odporu [ $K^{-1}$ ]

$R_0$  je odpor teplomeru pri teplote 0°C

### 3.4.2 Polovodičové odporové senzory teploty

Polovodičové odporové senzory využívajú podobne ako kovové odporové senzory teplotnú závislosť odporu na teplote. u polovodičov je dominantná teplotná závislosť koncentrácie nosičov

náboja podľa vzťahu:

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (2.4)$$

kde;  $\Delta E$  je šírka medzery medzi energetickými hladinami v mriežke

$k$  Boltzmannova konštanta

Polovodičové odporové senzory sa rozdeľujú na:

**termistory** - negastory - termistory so záporným teplotným súčiniteľom odporu

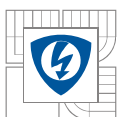
- posistory - termistory s kladným teplotným súčiniteľom odporu

**monokryštalické odporové senzory**<sup>21</sup>

### 3.4.3 Termoelektrické snímače teploty – termočlánky

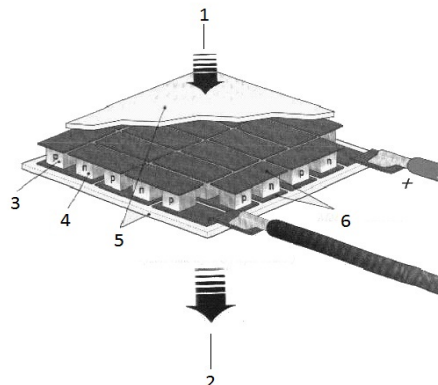
Termoelektrické snímače teploty patria medzi kontaktné snímače (snímač je v priamom styku s meraným prostredím - médiom) používané na diaľkové meranie teploty. Ich senzor (termočlánok) prevádza teplotnú zmenu okolia na zmenu elektrického napätia. Termočlánok je teda elektrický teplomer, využívajúci vznik termoelektrického napätia vplyvom teploty. Tento vzťah popisujú termoelektrické javy:

- A. Seebeckov jav – v obvode z dvoch vodičov, vyrobených z rôznych materiálov, ktoré sú na oboch koncoch spojené, spôsobí rozdiel teplôt na koncoch týchto vodičov vznik elektromotorického napätia. V obvode sa objaví napätie a začne ním pretekať prúd. Seebeckov jav sa prejaví vznikom termoelektrického napätia.



**B. Peltierov jav** – elektrický prúd tečúci obvodom z dvoch rôznych materiálov spôsobí, že obidva spoje týchto materiálov majú rozdielnu teplotu.

1. absorbované teplo
2. vyžarované teplo
3. polovodič typu P
4. polovodič typu N
5. keramika
6. medený mostík



**Obr. 2 - Peltierov článok**

**C. Thomsonov jav** – v obvode z jedného materiálu nepôsobí pretekánie elektrického prúdu zmenu teploty. V kovových materiáloch nespozorovali vznik napätia v jednom vodiči, na ktorých miestach pôsobili rozličné teplotné gradienty.<sup>22</sup>

### 3.4.3.1 Rozdelenie termočlánkov

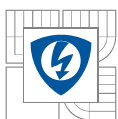
V súčasnosti sa používajú termočlánky podľa normy IEC 584-1 alebo STN EN 60584-1. Táto norma obsahuje tabuľky základných hodnôt termoelektrického napätia jednotlivých termočlánkov a polynómy pre výpočet ich charakteristík. Menej sa už používajú termočlánky podľa normy DIN 43710. Zloženie termočlánkov podľa normy IEC a DIN 4370 uvádza tabuľka 2. V normách sú uvedené základné hodnoty termoelektrického napätia pre referenčnú teplotu 0 °C. V praxi sa bežne používajú iné porovnávacie teploty (napr. +20, +50, +70 °C) podľa týchto porovnávacích teplôt je potrebné namerané hodnoty termoelektrického napätia korigovať.<sup>23</sup>

Označenie termočlánkov podľa IEC 584	Zloženie	Merací rozsah °C
T	Cu-CuNi	-200 až +350
J	Fe-CuNi	-200 až +750
E	NiCr-CuNi	-100 až +900
K	NiCr-NiAl	-200 až +1200
N	NiCrSi-NiSi	-200 až +1200
S	PtRh10-Pt	0 až +1600
R	PtRh13-Pt	0 až +1600
B	PtRh30-PtRh6	0 až +1700
Označenie termočlánkov podľa DIN 43710	Zloženie	Merací rozsah °C
L	Fe-CuNi	-200 až +900
U	Cu-CuNi	-200 až +600

**Tab. 2 - Rozdelenie termočlánkov podľa noriem IEC A DIN**

## 3.5 Bezdotykové meranie teploty – pyrometria

Bezdotykové meranie teploty je veľmi jednoduchý, rýchly a presný spôsob merania teploty. Každé teleso, ktoré má povrchovú teplotu vyššiu ako je absolútna nula, vysiela elektromagnetické žiarenie, odpovedajúce jeho teplote. Bezkontaktné meranie teploty využíva časť



elektromagnetického spektra v rozmezí vlnových délek 0,4 $\mu$ m až 1mm. Tento rozsah zahrnuje oblast viditelného světla a také oblast infračerveného spektra. Základním vztahem pro bezdotykové měření teploty je Stefan-Boltzmanov zákon, který říká, že hustota žiarivého toku  $E$  [W.m<sup>-2</sup>] vyžarovaného z jednotky plochy zdroja je na všech vlnových délkách úmerná štvrtej mocnine absolútnej teploty telesa. Tento zákon bol odvodený pre tzv. absolútne čierne teleso, ktoré je definované ako ideálne teleso, ktoré pohlcuje celú radiáciu ktorá na neho dopadá, bez ohľadu na vlnovú dĺžku a uhol, pod ktorým je povrch telesa ožiarený. Pomer celkového žiarivého toku  $q$  vyžiarený daným telesom k žiarivému toku  $q_0$ , ktoré by vyžiarilo absolútne čierne teleso sa nazýva *emisivita*  $\varepsilon$  [-]. Nadobúda hodnotu od 0 po 1, pričom číselne vyjadruje zhoršenie vyžarovacích vlastností zdroja v porovnaní s absolútne čiernym telesom a závisí na vlnovej dĺžke vyžarovania s teplotou telesa.<sup>24</sup>

Čierne teleso	1,00
Čierny lak	0,99
Voda	0,95
Oceľový plech	0,75
Hliník	0,55
Lesklý oceľový plech	0,25

**Tab. 3** – Hodnoty emisivity pre rôzne druhy materiálov

### 3.5.1 Základné parametre senzorov žiarenia

*Integrálna citlivosť*  $K$  je daná podielom elektrického signálu  $U$  na výstupe senzoru a žiarivého toku  $\phi$  dopadajúceho na citlivú plochu senzoru.

$$K = \frac{U}{\phi} [V.W^{-1}] \quad (2.5)$$

*Spektrálna citlivosť*  $K_\lambda$  udáva závislosť citlivosti  $K$  na vlnovej dĺžke  $\lambda$

$$K_\lambda = \frac{U}{\phi_\lambda} \quad (2.6)$$

*NEP (noise equivalent power)* udáva žiarivý tok, pri ktorom je hodnota výstupného signálu  $U$  rovná efektívnej hodnote spektrálnej hustoty šumového napätia ( $u_s$ )

$$NEP = \phi \frac{\sqrt{u_s^{-2}}}{U} \left[ W.Hz^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.7)$$

*Defektivita* – detekčná schopnosť, ktorá je definovaná ako prevrátená hodnota NEPu. Je tiež označovaná ako merná detektivita<sup>8</sup>

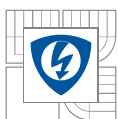
### 3.5.2 Základy pyrometrie

Bezdotykové meranie je v podstate meranie povrchovej teploty telies na základe elektromagnetického žiarenia medzi telesom a senzorom žiarenia a to od 0,4  $\mu$ m do 25  $\mu$ m vlnovej dĺžky. Uvedený rozsah pokrýva meranie teploty od -40°C do +10 000 °C.

#### Výhody bezdotykového merania

- priamy spôsob merania teploty





- nedochádza k namáhaniu snímača
- možnosť spojitého merania teploty
- rýchle sledovanie zmeny teploty
- meranie teploty pohybujúcich sa objektov
- zanedbateľný vplyv meracej techniky na meraný objekt
- možnosť merania teploty v korozívnom prostredí
- prostredníctvom optiky a prípadnej mechaniky možnosť realizovať riadkové alebo plošné zobrazenie povrchovej teploty telesa (napr. termovízia)

#### Nevýhody bezdotykového merania

- možnosť merať len povrchovú teplotu telesa
- chyby merania spôsobené optickou priepustnosťou prostredia
- pre správne meranie teploty, musíme poznať emisivitu meraného telesa
- veľký vplyv na meranie majú dážď, prach, para a plyny<sup>25</sup>

### 3.5.3 Pyrometre

V technickej praxi sa používajú štyri druhy pyrometrov. *Jednopásmové, dvojpásmové, viacpásmové a pyrometre nezávislé na emisivite.* Jednopásmové pyrometre merajú teplotu prostredníctvom žiarenia v úzkom pásme vlnových dĺžok. Šírka pásma vlnových dĺžok je od 10 nm do jednotiek  $\mu\text{m}$ . Pásmo vlnových dĺžok je dané spektrálnou citlivosťou kvantového senzoru žiarenia, spektrálnou priepustnosťou optiky a optických filtrov a spektrálnej priepustnosti prostredia (atmosféry). Dvojpásmové pyrometre vyhodnocujú teplotu objektu na základe pomeru dvoch žiarí pri dvoch vlnových dĺžkach. Pyrometre sú kalibrované pri tzv. teplote spektrálneho zloženia (t.j. teplote čierneho telesa), pri ktorej je pomer žiar pre dve vlnové dĺžky  $\lambda_1, \lambda_2$  rovnaký ako pomer žiar na meranom telese pri skutočnej teplote  $T_s$ .

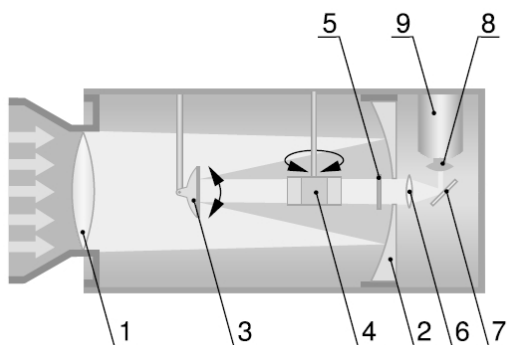
Existuje rada pyrometrov, u ktorých sa výrobcovia rôznym spôsobom snažia o *nezávislosť na emisivite* meraného povrchu. Jedným z týchto princípov sú napr. merania jednopásmovým pyrometrom, a to striedavo žiarenie z meraného predmetu a žiarenie z meraného predmetu ožiareného laserom s presne definovanou intenzitou žiarenia, ktorý ožaruje povrch z rovnakého uhlu. Mikroprocesorovým systémom môžeme potom vypočítať teplotu bez znalosti emisivity. Všeobecne ale platí, že pyrometre s automatickou kalibráciou emisivity nedosahujú presnosti štandardných jednopásmových pyrometrov.<sup>26</sup>

### 3.5.4 Termovízne prístroje

Termovízne systémy sú systémy pre bezdotykové meranie teplotných polí. Takéto systémy môžeme rozdeliť na systémy *bez rozkladu* a *s rozkladom obrazu*. Všeobecne termovízne prístroje slúžia na zobrazenie teplotného poľa na povrchu meraného povrchu. Využívajú vyžarovanie objektov v infračervenej oblasti spektra. Teplotné pole je snímané špeciálnou kamerou s teplotným snímačom a zobrazuje sa na obrazovke. Pole sa zobrazuje ako termogram v rôznych farebných odtieňoch. Základ termovízneho systému predstavuje prvok citlivý na dopadajúce infračervené žiarenie. Najpoužívanéjšie prvky sú kvantové alebo pyroelektrické detektory. Kvantový detektor pri dopade infračerveného žiarenia zvýši svoju elektrickú vodivosť. Kvôli



tomuto faktu sa musí chlaď na nízku teplotu. Pyroelektrický detektor sa pri dopade infračerveného žiarenia ohreje a vznikne v ňom elektrický náboj. Narozdiel od kvantových detektorov, nevyžadujú chladenie. Termovízne prístroje sa konštruujú ako systémy s postupným opticko-mechanickým rozkladom obrazu (obr. 6). Tepelné lúče, ktoré vyžaruje meraný objekt, prechádzajú cez objektív kamery (1) a dopadajú na duté zrkadlo (2). Od neho sa odrážajú na ploché zrkadlo (3) a ďalej sa lúče odrážajú a sústreďujú na osemboký hranol (4). Rozkmitaný lúč pozdĺž riadka prechádza clonou (5), šošovkou (6) a zrkadlo (7) ho odráža na fotočlen (8). Fotočlen sa nachádza na dne Dewarovej nádoby (9) naplnenej tekutým dusíkom, čím sa zabezpečuje chladenie fotočlena.<sup>27</sup>



1. objektív kamery
2. duté zrkadlo
3. ploché zrkadlo
4. hranol
5. clona
6. šošovka
7. zrkadlo
8. fotočle
9. Dewarova nádoba

**Obr. 3** – Termovízia s opticko-mechanickým rozkladom obrazu

## 4 ELEKTRICKÉ STROJE

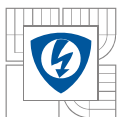
### 4.1 Úvod do problematiky elektrických strojov

Elektrický motor je konštrukčne veľmi zložitý stroj, ktorý je zložený z rady rôznych obvodov a materiálov. Je to točivý stroj, ktorý mení elektrickú energiu na mechanickú prácu, na základe elektromagnetického princípu. Základom tohto princípu je vzájomné silové pôsobenie elektromagnetických polí, vytváraných elektrickými obvodmi motoru, ktorými preteká elektrický prúd. Túto silu popisuje Lorentzov zákon sily. V rotačnom motore je umiestnený rotor tak, aby magnetické pole vytvárané vo vodičoch rotoru a magnetické pole statoru vyvíjali krútiaci moment prenášaný na rotor stroja. Tento krútiaci moment spôsobuje rotáciu rotoru, motor sa točí a vykonáva mechanickú prácu. Z elektrických motorov sú najvýznamnejšie a najvyužívanejšie motory asynchrónne, synchronne a komutátorové.

### 4.2 Komutátorové motory

Striedavé komutátorové motory združujú v sebe výhodné regulačné schopnosti jednosmerných motorov s výhodou priameho napojenia na striedavú rozvodnú sieť, ktorou sa vyznačujú indukčné motory.

Podľa počtu fází môžeme komutátorové motory rozdeliť na jednofázové a trojfázové.



### Popis stroja:

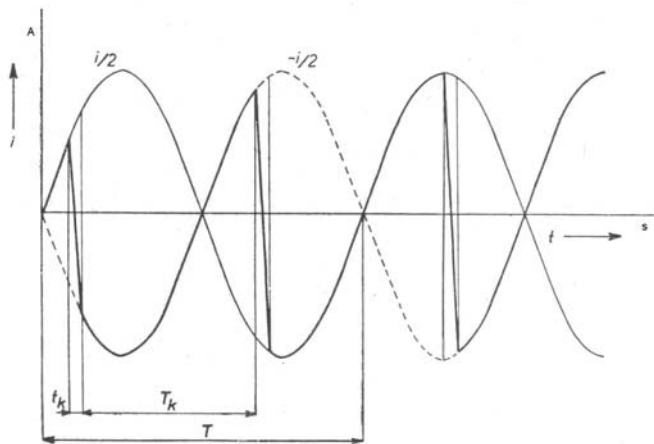
Rotor pozostáva z normálnej jednosmernej kotvy s komutátorom a stator má pri menších jednofázových strojoch vyjadrené póly, väčšie jednofázové a všetky trojfázové stroje majú stator s rozloženým vinutím, uloženým v drážkach. Keďže statorovým obvodom sa uzatvára striedavý magnetický tok, musí byť v každom prípade zložený z dynamových plechov. Komutátor motoru na striedavý prúd, slúži ako menič kmitočtu.

### Používané druhy komutátorových motorov na striedavý prúd:

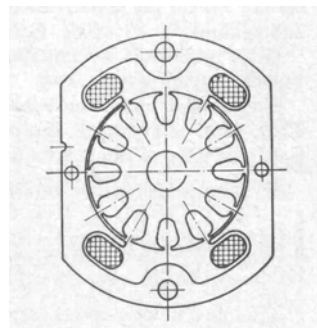
- jednofázový sériový motorček slúžiaci na pohon menších spotrebičov. Môže pracovať na striedavej aj jednosmernej sieti.
- jednofázový sériový trakčný motor
- repulzný jednofázový motor
- trojfázový derivačný motor napájaný do statora (Winterov-Eichbergov motor)
- trojfázový derivačný motor napájaný do rotora (Schrageho motor)
- trojfázový sériový komutátorový motor

### Komutácia v striedavom magnetickom poli

Ako pri jednosmernom stroji, tak aj pri komutátorov stroji na striedavý prúd musí sa za čas komutácie  $t_k$  zmeniť prúd v komutujúcej cievke z hodnoty  $i/2$  na hodnotu  $-i/2$ . Komutujúci prúd je ale striedavý, s kmitočtom siete  $f_s$ , takže komutácia istej cievky nastáva vždy pri inej hodnote prúdu.<sup>28</sup>



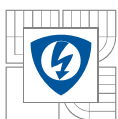
**Obr. 4 -** Komutácia v jednej cievke komut. stroja na str. prúd



**Obr. 5 -** Magnetický obvod univerzálneho motorčeka

## **4.2.1 Jednofázový sériový komutátorový motor**

Jednofázový sériový motor je najrozšírenejším komutátorovým strojom na striedavý prúd. Používajú sa na najrozličnejšie účely, najmä tam, kde sa žiadajú vyššie otáčky ktoré je možné dosiahnuť indukčnými motormi. Slúžia pre pohon ručného náradia, ventilátorov, počítačich strojov, vŕtačiek, vysávačov a pod. Môžu pracovať aj pri napájaní jednosmerným prúdom, preto



sa nazývajú univerzálnymi motormi. Magnetický obvod motora je veľmi jednoduchý. Stroj je zvyčajne dvoj pólový, pomocné póly sa nepoužívajú.

Výkon pri jednosmernom prúde:

$$P_{\text{=}} = U.I \quad (2.8)$$

Výkon pri striedavom prúde:

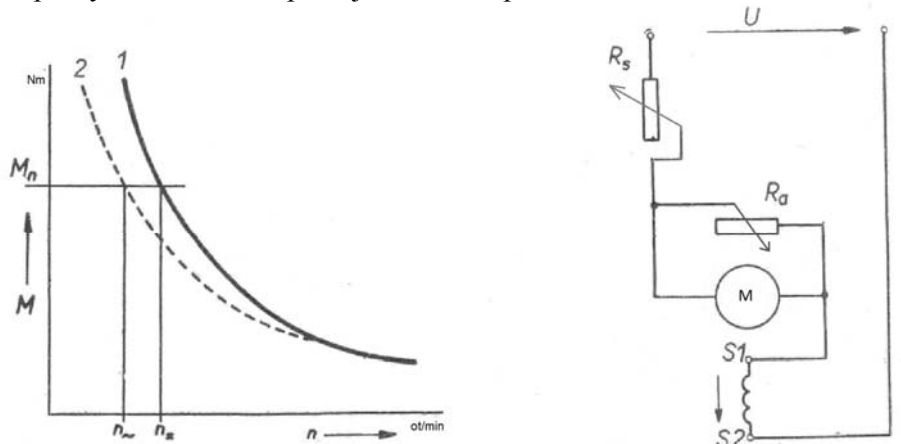
$$P_{\approx} = U.I.\cos\varphi \quad (2.9)$$

Príslušné momenty pri zanedbaní strát:

$$M_{\text{=}} = \frac{2.\pi.n_{\text{=}}}{60} U.I \quad (3.0)$$

$$M_{\approx} = \frac{2.\pi.n_{\approx}}{60} U.I.\cos\varphi \quad (3.1)$$

Momentová charakteristika je pre oba druhy prúdov sériová, podľa obr. 9. Výhodou sériového motora je veľký záberný moment. Menovité otáčky bývajú v rozsahu od 2000 do 10 000 ot/min a pri vyšších otáčkach pracuje motor s lepším účinníkom. <sup>29</sup>



**Obr. 6 -** Momentová charakteristika univerzálneho motoru a regulácia otáčok motoru

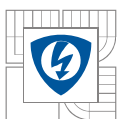
Legenda: 1. Momentová charakteristika jednosmerného prúdu. 2. Momentová charakteristika striedavého prúdu

### 4.3 Zaťažovanie elektrického stroja

Zaťažovanie elektrických strojov je dané spracovateľskou technológiou pracovných strojov a zariadení. Zvlášť elektrické pohony je možné zaťažovať podľa vopred danej časovej funkcie alebo v uzavretom regulačnom obvode, adaptívne k danej spracovateľskej technológii.

Z hľadiska vyšetrovania zaťaženia ich môžeme rozdeliť do troch základných skupín, ktorým sa skutočné rozloženie viac alebo menej približuje:

- **Trvalé zt'aženie** – je to zaťaženie, pri ktorom motor dosiahne ustálené oteplenie, pri práci motora bez prestávok. Oteplenie a zaťaženie nemusia mať menovitú hodnotu.



- **Krátkodobé zaťaženie** (krátkodobý chod) – predstavuje chod pohonu, kde doba zaťaženia je kratšia ako doba potrebná na ustálené oteplenie. Doba chodu naprázdno (prestávky) je tak dlhá, že stroj dosiahne teploty okolia (doby zaťaženia sú v rozsahu 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 minút).
- **Prerušované zaťaženie** (prerušovaný chod) – počas tohto zaťaženia sa strieda zaťažovanie počas doby  $t_z$  a chodu naprázdno (prestávky) po dobu  $t_0$ . Zaťaženie je charakterizované zaťažovateľom:

$$z = \frac{t_z}{t_c} \cdot 100 = \frac{t_z}{t_z + t_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.2)$$

kde;  $t_c$  – doba cyklu (predpokladá sa 10 minút)

$t_z$  – doba zaťažovania

$t_0$  – doba chodu naprázdno

Elektrické pohony sa vyrábajú zo zaťažovateľom 15, 25, 40, 60% (napr. žeriavové motory). V praxi sa vyskytujú ešte ďalšie spôsoby zaťaženia a to najmä:

- **Hodinové zaťaženie** – je také zaťaženie (výkon, prúd), pri ktorom dosiahne stroj menovité oteplenie za doby 60 minút (1 hodina). Vyskytuje sa hlavne v oblasti elektrickej trakcie, najmä pre trakčné motory. Na jeho základe sa zaviedli odvodené údaje, ako hodinový výkon a hodinový prúd.
- **Zaťažovanie podľa zaťažovacieho diagramu** (zaťažovacieho cyklu) – zaťažovací diagram je vopred známy alebo sa stanovuje odborným odhadom ako typový pracovný cyklus.<sup>30</sup>

## 4.4 Oteplenie elektrických strojov

Hlavným zdrojom tepla v elektrických prístrojoch, ale aj rozvádzačoch elektrickej energie, sú spomínané straty vo vodičoch, ktorými prechádza elektrický prúd. Toto teplo sa z časti odvedie povrchom A vodiča do okolia a z časti zostáva vo vodiči a zvyšuje jeho teplotu. Matematicky to môžeme zapísať nasledovne:

$$R \cdot I^2 dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta \vartheta dt + c V d \quad (3.3)$$

Riešením tejto rovnice dostaneme vzťah pre okamžitú hodnotu oteplenia:

$$\Delta \vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \left[ 1 - \exp - \frac{\alpha_0 \cdot A}{c V} t \right] = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.4)$$

kde;  $\Delta \vartheta$  je okamžitá hodnota oteplenia

$\Delta \vartheta_{\max}$  ustálené oteplenie

$e$  je základ prirodzených logaritmov

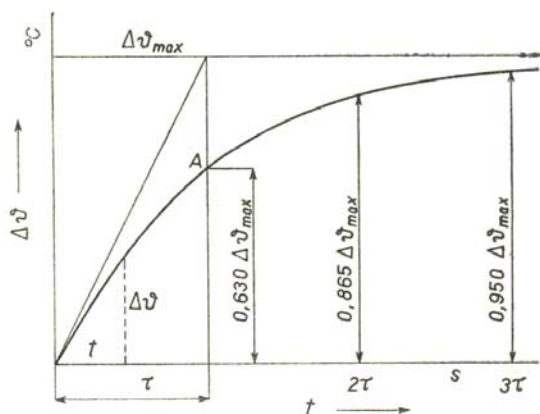
$t$  je čas v ktorom sa skúma okamžité oteplenie

$\tau$  je časová konštanta

Jeho grafom je exponenciála blížiac sa veľkosti ustáleného oteplenia  $\Delta\vartheta_{\max} = R \cdot I^2 / (\alpha_0 \cdot A)$  s časovou konštantou  $\tau = \frac{cV}{\alpha_0 \cdot A}$ . Graficky to znázorňuje obr. 11. Časová konštanta vyjadruje

dobu, za ktorú by teleso dosiahlo ustáleného oteplenia v prípade, že by sa z povrchu telesa neodvádzalo žiadne teplo, ale všetko by sa spotrebovalo iba na zvýšenie tepelného obsahu. V takomto prípade by oteplenie prebiehalo po dotýčnici, zostrojenej v počiatku otepľovacej krivky

31



Obr. 7 – Graf oteplenia vodiča v elektrickom stroji

Podrobné vyšetrenie tepelných dejov a oteplenia prístroja sa prevádza na matematických modeloch a neskôr overuje na reálnych elektrických strojoch. Stratové teplo sa odvádza buď do okolného vzduchu alebo do rôznych chladiacich systémov. Predávanie tepla medzi jednotlivými časťami motoru a medzi motorom a chladiacim systémom sa deje všetkými druhmi šírenia tepla a to: sálaním, vedením a prúdením. Ak chceme porozumieť tejto problematike, musíme zaviesť zjednodušujúce teoretické predpoklady. V tejto časti predpokladáme, že motor je homogénne telesom s nekonečne veľkou tepelnou vodivosťou, alebo s rovnomerne rozloženými zdrojmi tepla, čo v praxi znamená, že teplota motoru je vo všetkých častiach rovnaká. Ďalej predpokladáme, že teplo predávané okoliu je úmerné iba rozdielu teplôt. Za týchto predpokladov môžeme zapísať rovnicu tepelnej rovnováhy motoru, ktorá hovorí, že množstvo tepla vzniknuté v motore za jednotku času je rovné súčtu tepla spotrebovaného k otepleniu telesa motoru a tepla odvedeného do okolia. Preto platí rovnica:

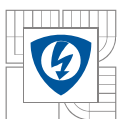
$$\Delta P dt = C d(\Delta\vartheta) + A \Delta\vartheta dt \quad (3.5)$$

kde;  $\Delta P dt$  sú straty motoru vo Wattoch,  $C$  je tepelná kapacita motoru ( $J \cdot K^{-1}$ ),  $\Delta\vartheta$  je oteplenie v Kelvinoch a  $A$  je súčiniteľ prestupu tepla do chladiča ( $W \cdot K^{-1}$ ).

Ľavá strana uvedenej rovnice predstavuje straty (energiu), ktorá sa počas  $dt$  mení na teplo. Prvý člen pravej strany predstavuje množstvo tepla, ktorým sa stroj otepľuje a druhý člen pravej strany predstavuje množstvo tepla, ktoré sa odvádza do okolia.

Po úpravách:

$$(P_z - S v \vartheta) dt = M c d\vartheta \Rightarrow dt = M c \frac{d\vartheta}{P_z - S v \vartheta} \quad (3.6)$$



Ak zavedieme označenie:

$$P_z - S_V \vartheta = u \quad (3.7)$$

A deriváciou:

$$-S_V d\vartheta = du \Rightarrow d\vartheta = -\frac{du}{S_V} \quad (3.8)$$

Dosadením tohto výrazu do základnej rovnice dostaneme:

$$dt = -\frac{Mc}{S_V} \frac{du}{u} \quad (3.9)$$

Následnou integráciou:

$$t = -\frac{Mc}{S_V} (\ln u - \ln k) = -\frac{Mc}{S_V} \ln \frac{u}{k} \quad (4.0)$$

Po úprave a dosadení

$$-t \frac{S_V}{Mc} = \ln \frac{P_z - S_V \vartheta}{k} \Rightarrow e^{-t \frac{S_V}{Mc}} = \frac{P_z - S_V \vartheta}{k} \Rightarrow P_z - S_V \vartheta = k e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \Rightarrow S_V \vartheta = P_z - k e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \quad (4.1)$$
$$\vartheta = \frac{P_z}{S_V} - \frac{k}{S_V} e^{-t \frac{S_V}{Mc}}$$

Integračnú konštantu určíme z počiatočných podmienok pre:  $t = 0, J = 0$

$$0 = \frac{P_z}{S_V} - \frac{k}{S_V} e^0 \Rightarrow \frac{k}{S_V} = \frac{P_z}{S_V} \Rightarrow k = P_z \quad (4.2)$$

Dosadením do pôvodnej rovnice pre  $J$  dostaneme rovnicu exponenciály, ktorá charakterizuje priebeh otepľovania a je pomocou nej možné určiť ustálenú teplotu a časovú konštantu:

$$\vartheta = \frac{P_z}{S_V} - \frac{P_z}{S_V} e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \Rightarrow \vartheta = \frac{P_z}{S_V} \left( 1 - e^{-t \frac{S_V}{Mc}} \right) \quad (4.3)$$

Na určenie ustálenej teploty použijeme čas  $t = \infty$  kedy platí  $J = J_k$  a dosadením dostaneme:

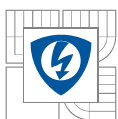
$$\vartheta_k = \frac{P_z}{S_V} \quad (4.4)$$

Z uvedenej rovnice vyplíva, že pri ustálenom oteplení sa všetky straty odvádzajú do okolia. Časová konštanta  $\tau$ :

$$\tau = \frac{Mc}{S_V} = \frac{Mc \vartheta}{S_V \vartheta} \Rightarrow \frac{\text{nahromadené teplo}}{\text{vyžiarené teplo}} \quad (4.5)$$

Zavedením a dosadením dostaneme:

$$\vartheta = \vartheta_k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (4.6)$$



Ak dosadíme do rovnice za  $t = t$ :

$$g = g_k (1 - e^{-1}) = g_k \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0,63 g_k \quad (4.7)$$

To znamená, že za dobu časovej konštanty sa zariadenie ohreje na 63% ustálenej konštanty.<sup>32</sup>

#### 4.4.1 Výpočet oteplenia

Výpočet oteplenia, pokiaľ nejde o veľmi veľké stroje, možno zjednodušiť tak, že sa zanedbá prestup z jednej časti do druhej, takže jednotlivé časti sa otepľujú iba tými stratami, ktoré v nich vznikajú.

*Statorový zväzok:*

Chladiaci povrch statorových plechov zistíme pomocou rovnice:

$$S_{Fe} = \pi \cdot d_e \cdot l_e \quad (4.8)$$

kde;  $d_e$  priemer stredy statorového plechu

$l_e$  chladiaci obvod statorového plechu

a príslušné oteplenie voči chladiacemu vzduchu:

$$\Delta g'_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{\alpha_1 \cdot S_{Fe}} \quad (4.9)$$

*Statorové vinutie:*

Teplotný spád sa skladá z dvoch častí, potrebných na:

- prestup tepla z povrchu do vzduchu
- prestup tepla cez izoláciu statorových čiel

$$\Delta g'_1 = \frac{\Delta P_{j1}}{\alpha_1 \cdot S_{\epsilon 1}} + \frac{\Delta P_{j1} l_i}{\lambda_i S_{\epsilon 1}} \quad (5.0)$$

kde; chladiaci povrch čela je:

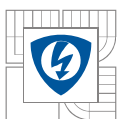
$$S_{\epsilon 1} = 2\pi \cdot d_{s1} \cdot l_{s1} \quad (5.1)$$

kde;  $l_i$  je hrúbka izolácie statorového čela

$\lambda_i$  je merná tepelná vodivosť izolácie statorových čiel (tab. hodnota)

$d_{s1}$  - priemer stredy statorových čiel

$l_{s1}$  - chladiaci obvod statorových čiel<sup>33</sup>



## 5 MERANIE OTEPLENIA V LABORATÓRIU - PRAKTICKÁ ČASŤ

Meranie oteplenia zvolených častí elektrického stroja prebiehalo v laboratóriu Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií pod vedením vedúceho práce s technickou podporou vedúceho laboratória p. Lišky.

K dispozícii boli v laboratóriu dva elektrické stroje. Prvým typom je motor č. 1 Muster Nr-2964. Druhým typom je zhodný typ motora č.2 Muster Nr-2964. Motory sa pri prevzatí nachádzali v poškodenom stave. Jedná sa o jednofázový komutátorový motor na striedavý prúd s napájacím napätím 230V, ktorý pochádza zo závodu BSH drives and Pumps s.r.o (Bosh a Siemens Home group, Slovensko). Motor je pôvodne určený pre pračku, ktorej menovité otáčky sa pohybujú v rozmedzí od niekoľko stoviek otáčok, až po 1200 ot/min.

Mojou prvou úlohou teda bola demontáž, zistenie závady stroja a ich oprava. Po detailnom rozobratí oboch strojov a preskúmaní jednotlivých častí, som našiel príčinu v poškodených zadných ložiskách strojov. Poškodenie týchto motorov bolo spôsobené požiarom v laboratóriu strojov, kedy v elektrickej sieti nastalo veľké preťaženie a motor sa roztočil na vysoké otáčky. Ložisko je od výroby stanovené na určitú hodnotu otáčania a prekročenie tejto hodnoty znamená poškodenie mechanickej časti ložiska.

Ďalej som sa zaoberal už len jedným typom motora, strojom s označením č.2. V laboratóriu sme pomocou sťahováku odstránili poškodené zadné ložisko stroja. Náhradu ložiska som našiel v katalógu Závodu kuličkových ložisiek v Brne a to pod označením: 6002-2Z. Nové ložisko sme pomocou lisu nalisovali späť na hriadeľ motora č. 2. Motor som zložil dohromady a mohlo nastať "testovacie" meranie na stroji. V prípade nefunkčnosti strojov som mal pripravenú alternatívu v podobe nového elektrického motora s označením: 1BA6755 dovezeného priamo z výroby BSH z Michaloviec.

### 5.1 Meranie v laboratóriu

Prvé meranie na elektrickom motore Muster Nr-2964 prebehlo 22.3.2011 v laboratóriu elektrických strojov Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií v Brne pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

Jedná sa o spomínaný jednofázový komutátorový motor pochádzajúci z pračky zo závodu BSH Michalovce. Štítkové hodnoty stroja ukazuje tabuľka 4.

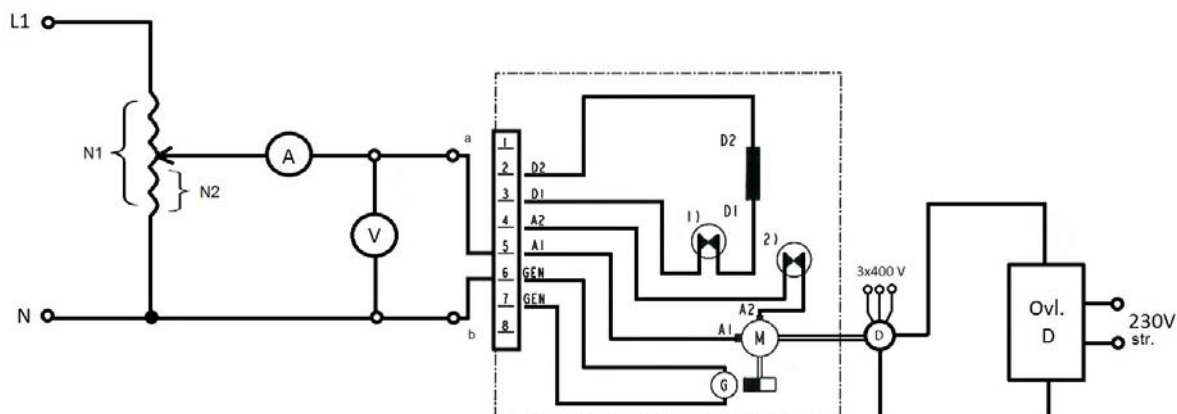
Moment	Otáčky	Prúd (A)	Napätie	Výkon	Príkon	Účinnosť	cosφ
0,20	14814	2,35	229,7	519,9	308,1	0,593	0,962
1,0	7724	5,45	227,7	809,9	1080,3	0,750	0,871
1,0	7800	5,46	227,6	815,0	1096,9	0,743	0,884

**Tab. 4 - Štítkové hodnoty motora**



### Návrh meracej sústavy pre meranie teploty:

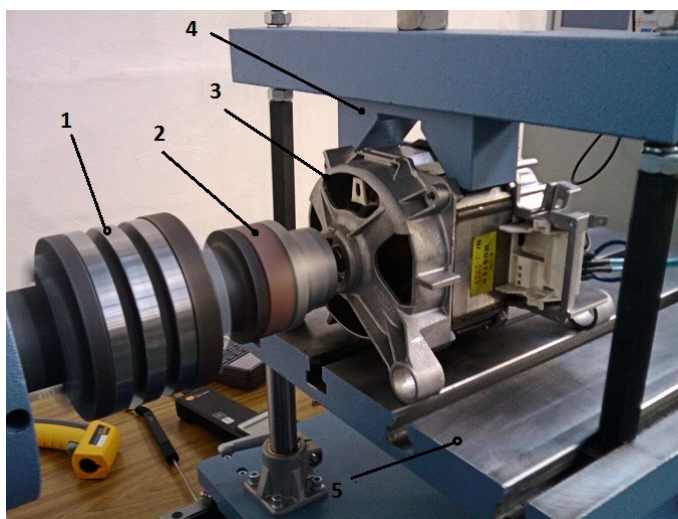
Pre správnu funkciu otáčania motora a merania sme stroj pripojili využitím spojky na dynamometer. Dynamometer, ktorého druhý názov je motorová brzda, je prístroj, ktorý dokáže merať točivý moment pri danom rozsahu otáčok stroja. Motor bol spojený s dynamometrom spojkou. Ako najvýhodnejšie a najjednoduchšie zapojenie motora sme zvolili pripojenie cez regulačný autotransformátor zapojený v pracovnom pulte. Pracovný pult obsahuje otočné ovládanie regulácie napätia pripojeného zariadenia, čo umožňuje jednoduché a presné ovládanie požadovaných hodnôt stroja. Z pracovného pultu sme cez svorky L1, N pripojili sériovo ampérmetr a paralelne voltmetr. Pripojený ampérmetr ukazoval hodnotu pretekajúceho prúdu motorom, voltmetr pracovné napätie stroja.



**Obr. 8** – Schéma zapojenia motoru

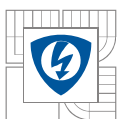
Legenda: A - ampérmetr, V - voltmetr, M - elektromotor s bud. vinutím, D - dynamometer, Ovl.D - ovládanie dynamometru

Dynamometer bol ovládaný diaľkovo cez dotykové ovládanie. Na displeji ovládania dynamometra sme mohli sledovať a nastavovať požadované otáčky stroja, výkon stroja a moment.



**Obr. 9** - Fotografia pripojenia motoru na dynamometer

Legenda: 1. dynamometer, 2. spojka, 3. elektromotor Muster, 4. trmeň, 5. podložka



Aparatúru na meranie vzniknutého tepla som zvolil z dostupných prvkov laboratória. K meraniu som použil 2 rôzne dotykové prístroje, pracujúce na odlišnej báze a pre bezdotykové meranie teploty som použil prístroj Fluke a termokameru SAT.

názov	výrobca	Typ/označenie	Parametre
Dynamometer	VUES Brno	ASD10K-2/128768	10kW/127Hz/7500 ot/min, 360 V/20,1A
Ampérmeter	Metra	4174087	
Voltmeter	Metra	DKP 1170/304	
Termometer	Testo	900	
Termometer	Metex	M-3860D	
Termometer	Fluke	1000016257	
Termokamera	SAT	HY6800	Rozlíšenie snímača: 320x240

**Tab. 5 - použité prístroje**

#### **Dotykové senzory:**

Testo 900 - jedná sa o staršiu priemyslovú sondu, ktorá dokáže presne merať teploty od -40°C do 1200°C vďaka NiCr-NiAl kontaktnému spoju. Presnosť prístroja výrobca udáva  $\pm 1\%$  pri vyšších teplotách.

Metex-386D - digitálny multimeter, ktorý okrem teploty dokáže merať jednosmerné, striedavé napätie, rezistanciu, frekvenciu, prúdy atď. Pripojenie termočlánku prebieha cez konektory na prednej strane multimetra a prístroj je schopný merať teplotu od 0°C do 1300°C.

#### **Bezdotykový senzor**

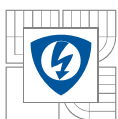
Fluke 62 mini - bezdotykový termometer na báze infračerveného žiarenia. Laser vyprodukovaný zariadením má dosah až 33 m a je schopný merať teplotu od -30°C do 500°C.

#### **Termokamera:**

SAT HY6800 - termokamera so snímačom, ktorý dostal názov: jednoliaty odporový bolometer, pracuje vo vlnovej dĺžke 8 až 14  $\mu\text{m}$ . Dokáže ukladať vyfotografované snímky na priloženú pamäťovú kartu v rozlíšení 320x240

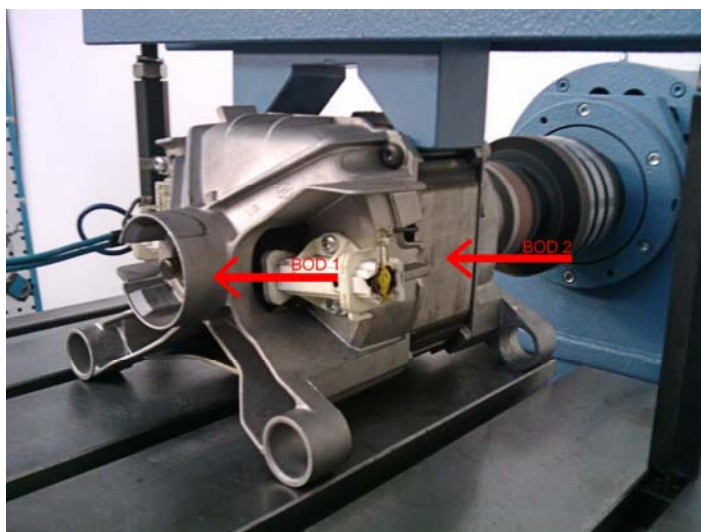


**Obr. 10 - Fotografia použitých prístrojov**



Legenda: 1. Testo 900, 2. Metex 386D, 3. Fluke 62 mini, 4. Termokamera SAT HY6800

Ako som už zmieňoval v predošlej časti práce, zvolené časti, na ktorých som meral oteplenie, sú zadné ložisko a stator. Presné miesta, na ktorých sa merala teplota, znázorňuje Obr. 11. Bod 1 znázorňuje ložiskový štít stroja. Bod 2 znázorňuje stred statorového zväzku.



**Obr. 11** - Fotografia motora s vyznačením meraných bodov

Legenda: Bod 1 – meraný bod na ložiskovom štíte, Bod 2 – meraný bod na statorovom zväzku

## 5.2 Program merania oteplenia vybraných častí stroja

Program merania oteplenia zahrňuje prípravu merania, stanovenie cieľu merania, použité prístroje, spôsob merania stroja, ako aj stanovenie zaťaženia stroja a dĺžku merania, vyhodnotenie, príslušné grafy a tabuľky s nameranými hodnotami. Program merania sa bude skladať z dvoch častí, meranie č. 1 - meranie oteplenia a meranie č.2 - meranie oteplenia s vymeneným zadným ložiskom. Správnu funkčnosť motora som overil testovacím meraním, kedy sme motor zaťažovali rôznymi momentami po dobu 30. minút.

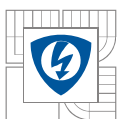
### 5.2.1 Meranie č.1

**Názov:** meranie oteplenia na elektrickom motore č. 2. Typ motoru: Muster Nr-2964

**Dátum a čas:** 28.3.2011, 08:00

**Cieľ:**

- dlhodobý chod motora a trvalé zaťaženie motora, kedy motor dosiahne ustáleného oteplenia.
- spustenie motora s protimomentom  $M=0,973 \text{ Nm}$ , kedy motor dosiahne otáčok  $5000 \text{ ot./min}^{-1}$



- zaťažovanie motora po dobu 180 minút, odčítavanie hodnôt z dotykového a bezdotykového termometru v presne stanovených intervaloch
- zaznamenávanie snímku z merania použitou termokamerou
- zastavenie motora a meranie teplôt na vybraných častiach motora
- zaznamenanie nameraných hodnôt do tabuľky 6

#### **Vyhodnotenie:**

Meranie sa uskutočnilo presne podľa programu merania a nebolo sprevádzané žiadnymi komplikáciami. Zaznamenané hodnoty teplôt zobrazuje tab. 6. Motor bol pripojený na dynamometer a jeho spustenie sme mali dopredu stanovené.

#### **Podmienky spustenia:**

Postupné zaťažovanie motora až do hodnoty:

$U=180\text{ V}$ ,  $I = 5\text{ A}$  a protimoment dynamometra:  $M=0,973$

Teplota prostredia v dobe štartu sa pohybovala na hranici  $18^{\circ}\text{C}$ .

Meranie zvolených častí stroja prebiehalo za použitia dvoch dotykových, jedného bezdotykového snímača teploty a termokamerou SAT.

Vysvetlivky ku meraným hodnotám:

$T_{1dM} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložiskovom štíte dotykovým snímačom Metex 386D

$T_{2dM} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku dotykovým snímačom Metex 386D

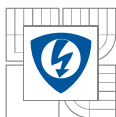
$T_{1dT} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložiskovom štíte dotykovým snímačom Testo 900

$T_{2dT} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku dotykovým snímačom Testo 900

$T_{1bF} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložiskovom štíte bezdotykovým snímačom Fluke 62 mini

$T_{2bF} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku bezdotykovým snímačom Fluke 62 mini

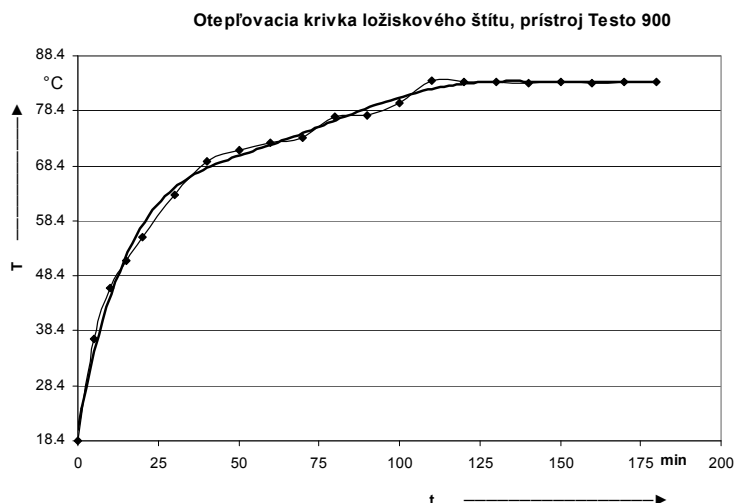
Počas chodu a zaťažovania motora, vykazoval motor výkon:  $P=509\text{ W}$  a jeho iskrenie bolo 1 a 1/4. Merania oteplenia začalo o 9:11 a skončilo 12:11.



Č. merania	čas [min]	$T_{1dM}$ [°C]	$T_{2dM}$ [°C]	$T_{1dT}$ [°C]	$T_{2dT}$ [°C]	$T_{1bF}$ [°C]	$T_{2bF}$ [°C]
1	0	22	23	18.4	18.5	19.4	19.6
2	5	36	32	36.9	28.9	31.8	25.6
3	10	48	39	46.2	37.1	37.2	27.2
4	15	55	45	51.2	43.6	41.8	29.4
5	20	58	49	55.4	49.9	43.0	31.5
6	30	64	61	63.1	59.1	48.2	37.6
7	40	74	66	69.1	73.4	52.4	40.8
8	50	78	71	71.3	77.3	57.2	41.8
9	60	80	72	72.6	82.0	57.6	43.8
10	70	80	73	73.6	84.1	58.0	44.2
11	80	81	75	77.4	84.2	58.1	46.2
12	90	83	76	77.6	84.3	59.6	46.3
13	100	83	79	79.9	85.2	63.4	47.4
14	110	83	79	83.8	88.2	63.3	47.6
15	120	84	80	83.7	91.2	63.6	47.7
16	130	84	80	83.6	91.3	63.3	47.8
17	140	84	80	83.5	91.1	63.3	47.7
18	150	84	81	83.6	91.4	63.6	48.4
19	160	84	81	83.5	91.3	63.8	48.6
20	170	84	81	83.7	91.2	63.6	48.4
21	180	84	81	83.6	91.3	63.6	48.5

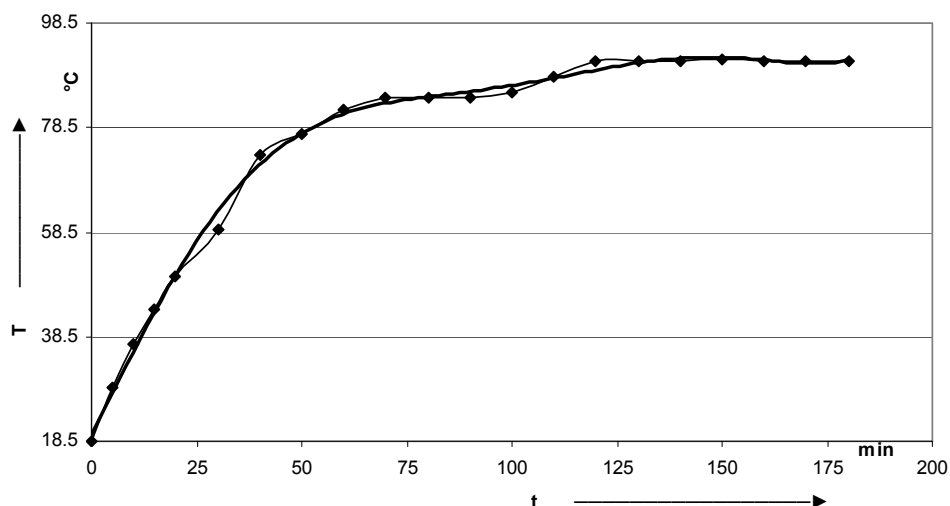
Tab. 6 - Zaznamenané hodnoty z merania č. 1

Zo získaných hodnôt je možné zostrojiť graf oteplenia stroja, ktorým je vzrastajúca exponenciála vyjadrujúca závislosť času na teplote. Príklady takýchto grafov ukazuje obr. 15 a 16, kde farebná krivka zobrazuje oteplenie na danej časti stroja a je zostrojená pomocou polynomickej funkcie tretieho stupňa. Zobrazenie oteplenia všetkými prístrojmi zobrazuje obr. 17



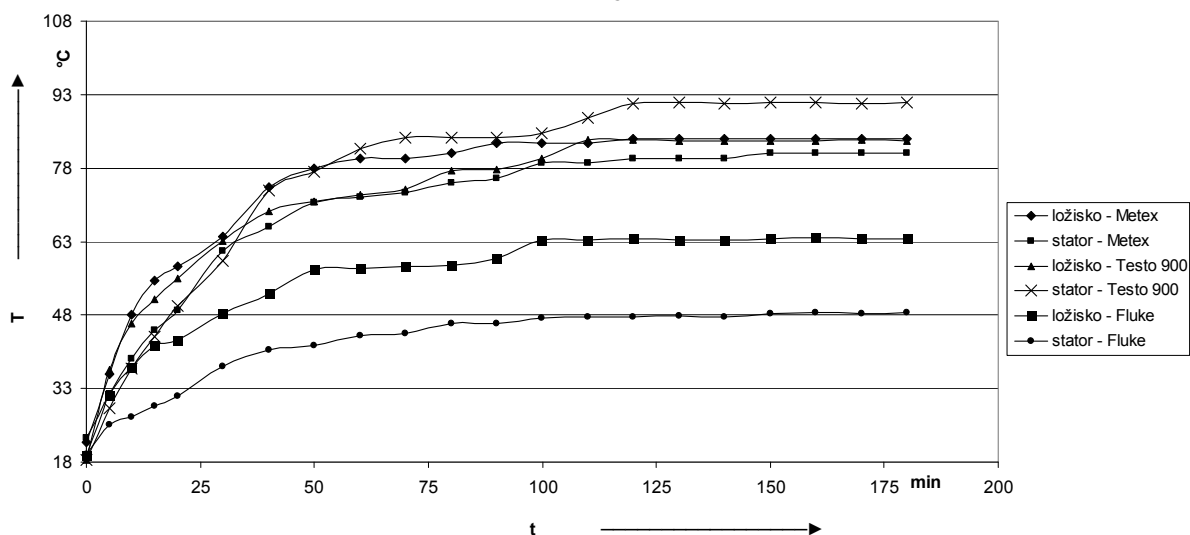
Obr. 12 - Otepľovacia krivka ložiska pri použití prístroja Testo 900

Oteplovacia krivka satorového zväzku, prístroj Testo 900



Obr. 13 - Oteplovacia krivka satorového zväzku pri použití prístroja Testo 900

Oteplovacie krivky - meranie č. 1



Obr. 14 - Oteplovacie krivky merania č.1

### Výsledky merania:

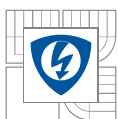
Z rovnice okamžitého oteplení, ktorou je:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (5.2)$$

môžeme jednoducho vypočítať okamžitú hodnotu oteplení na jednotlivých častiach s rôznymi použitými prístrojmi.

Okamžitá hodnota oteplení v čase  $t=60$  min s použitím Testa 900 na ložiskovom štíte:





$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) = 83,6 \cdot (1 - e^{\frac{-60}{0,630 \cdot 83,6}}) = 56,84^{\circ}\text{C} \quad (5.3)$$

Okamžitá hodnota oteplení v čase  $t=60$  min s použitím Testa 900 na statorovém zvázku:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) = 91,3 \cdot (1 - e^{\frac{-60}{0,630 \cdot 91,3}}) = 59,13^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

Okamžitá hodnota oteplení v čase  $t=60$  min s použitím přístroje Metex na ložiskovém štíte:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) = 84 \cdot (1 - e^{\frac{-60}{0,630 \cdot 84}}) = 56,96^{\circ}\text{C} \quad (5.5)$$

Okamžitá hodnota oteplení v čase  $t=60$  min s použitím přístroje Metex na statorovém zvázku:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) = 81 \cdot (1 - e^{\frac{-60}{0,630 \cdot 81}}) = 56^{\circ}\text{C} \quad (5.6)$$

Výpočet časové konstanty pro oteplení ložiskového štítu za pomoci přístroje Testo 900:

$$\tau = 0,630 \cdot \Delta \vartheta_{\max} = 0,630 \cdot 83,6 = 52,66 \text{ min} \quad (5.7)$$

t.z že ak by stroj neodvádzal do okolia žiadne teplo, oteplil by sa o 52,66 minút na hodnotu ustáleného oteplení.

Výpočet časové konstanty pro statorového zvázku za pomoci přístroje Testo 900:

$$\tau = 0,630 \cdot \Delta \vartheta_{\max} = 0,630 \cdot 91,2 = 57,45 \text{ min} \quad (5.8)$$

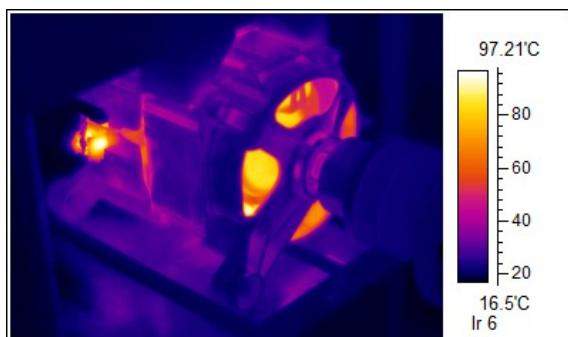
Oteplení ložiskového štítu s použitím přístroje Testo 900:

$$\vartheta = \Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 = 83,6 - 18,4 = 65,2^{\circ}\text{K} \quad (5.9)$$

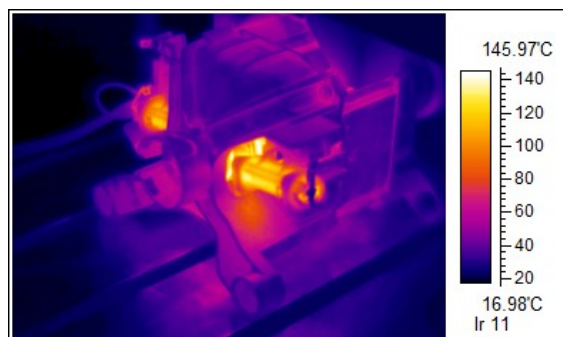
Oteplení statorového zvázku s použitím přístroje Testo 900:

$$\vartheta = \Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 = 91,3 - 18,5 = 72,8^{\circ}\text{K} \quad (6.0)$$

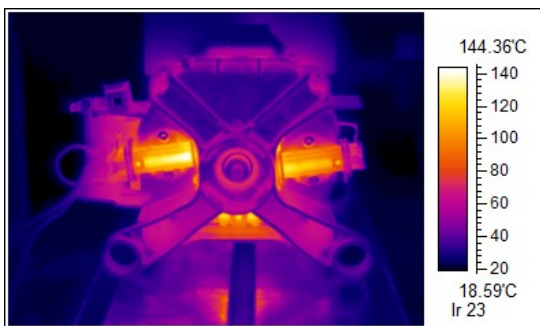
Posledným použitým přístrojem při meraní, bola termokamera SAT H6800. Počas 180 minútového merania som celkovo vyfotografoval 22 snímku. Snímky som ukladal každých 30 minút na pamäťovú kartu v termokamere. Uložené snímky jasne zobrazujú detailné vyobrazenie rozloženia teploty na motore a umožňujú prehľadne porovnať teploty jednotlivých častí stroja.



Obr. 15 - Snímek z termokamery v čase 9:30



Obr. 16 - Snímek z termokamery v čase 10:30



**Obr. 17 - Snímek z termokamery v čase 12:00**

Nastavenie emisivity termokamery bolo 0,6. Keďže je elektrický motor zložený z niekoľkých materiálov, je ťažké stanoviť jednoznačne hodnotu emisivity. Preto bolo potrebné najskôr zmerať teplotu vybraného bodu stroja pomocou iného teplomera a hodnotu emisivity nastavovať tak, aby zobrazovaná teplota bola zhodná so zmeranou teplotou.

Ďalšie snímky je možné nájsť na str. 54 v časti *Prílohy*.

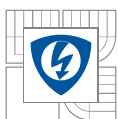
#### **Záver:**

Meranie č.1 - oteplenie vybraných častí elektrického stroja nám dovolilo porovnať jak použité metódy, tak merané časti stroja. Zo získaných výsledkov vyplýva, že najpresnejším použitým prístrojom bola priemyslová sonda Testo 900. Hodnota ustáleného oteplenia v prípade ložiskového štítu, dosahuje hodnôt  $83,7^{\circ}\text{C}$  a v prípade statorového zväzku  $91,3^{\circ}\text{C}$ . Tieto hodnoty ale nie sú v reálnej prevádzke dosiahnuteľné. Stroj je určený pre použitie v pračke, ktorá nie je v prevádzkovom režime 180 minút, tak ako naša skúška. Taktiež stroj nepracuje pri otáčaní 5000 otáčok za minútu a protimoment, ktorý vydáva bubon práčky tiež nedosahuje tak vysokých hodnôt ako je  $0,973\text{ Nm}$ . Musíme taktiež brať do úvahy, že elektrický stroj sa nachádza vo vnútri konštrukcie (pračky), čo má za následok hromadenie tepla, ktoré spôsobuje zas iné hodnoty tepla na stroji. Simulovať tento elektrický stroj pri prevádzkovom režime, je veľmi obtiažne a za našich podmienok nerealizovateľné.

Pri porovnaní nameraných hodnôt tepla použitými prístrojmi, vidíme veľké odlišnosti. V prípade porovnania hodnôt použitím prístroja Testo 900 a Metex sa hodnoty od seba nelíšia tak, ako pri porovnaní hodnôt s bezdotykovým snímačom Fluke. Odlišnosť môže byť spôsobená chybou prístroja Fluke, odrazom laserového lúča od lesklej plochy stroja, poprípade zlým nakalibrovaním snímača. Hodnoty ustáleného oteplenia pri použití prístroja Fluke sa od ostatných použitých prístrojov líšia o  $35\text{--}45^{\circ}\text{C}$ . Pri porovnaní ustáleného oteplenia prístrojov Testo a Metex vidíme, že teplota ložiska sa líši len o  $0,4^{\circ}\text{C}$ , ale teplota statorového zväzku sa líši až o  $10,3^{\circ}\text{C}$ . Rozdiel hodnôt môže byť spôsobený nedokonalým priložením meracej sondy na povrch statoru, ktorý je drážkovaný.

Vypočítaná hodnota časovej konštanty ložiskového štítu pri použití prístroja Testo 900 je rovná hodnote 52,66 min. Zostrojená časová konštanta z grafu (obr. 13, časť prílohy) vychádza na 24 min. Rozdiel týchto dvoch hodnôt môže byť spôsobený tým, že pri výpočte nie je možné počítať s prudkým nárastom teploty na začiatku merania.





### 5.2.2 Meranie č. 2

**Názov:** meranie oteplenia na elektrickom motore č. 2. Typ motoru: Muster Nr-2964

Dátum a čas: 25.4.2011, 08:00

**Cieľ:**

- dlhodobý chod motora a trvalé zaťaženie motora, kedy motor dosiahne ustáleného oteplenia s použitím hybridného zadného ložiska SKF 6202-2RSLTN9/HC5C3WT
- spustenie motora s protimomentom  $M=0,973 \text{ Nm}$ , kedy motor dosiahne otáčok  $5000 \text{ ot./min}^{-1}$
- zaťažovanie motora po dobu 180 minút, odčítavanie hodnôt z dotykového a bezdotykového termometru v presne stanovených intervaloch
- zaznamenávanie snímkou z merania použitou termokamerou
- zastavenie motora a meranie teplôt na vybraných častiach motora
- zaznamenanie nameraných hodnôt do tabuľky č. 7

**Vyhodnotenie:**

Meranie č. 2 sa líši od prvého merania použitím odlišného zadného ložiska. Bolo použité hybridné ložisko od firmy SKF, s konkrétnym označením 6002-2RSLTN9/HL5C3WT, ktoré bolo vyrobené v Taliansku. Montáž ložiska prebehla 4 dni pred samotným meraním a obsahovala rozmontovanie motora, stiahnutie pôvodného ložiska ZKL, nalisovanie hybridného ložiska a opätovné zloženie motora. Nasledovalo znovupripojenie motora na dynamometer a spustenie motora. Spustenie motora začalo o 8:04 a celkové ukončenie merania nastalo o 11:04.

**Podmienky spustenia:**

Postupné zaťažovanie motora až do hodnoty:

$U=180 \text{ V}$ ,  $I = 5 \text{ A}$  a protimoment dynamometra:  $M=0,973$

Teplota pri začiatku merania bola o 1 stupeň nižšia ako v predošlom meraní, teda  $17^{\circ}\text{C}$

Vysvetlivky ku meraným hodnotám:

$T_{1dM} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložisku dotykovým snímačom Metex 386D

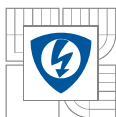
$T_{2dM} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku dotykovým snímačom Metex 386D

$T_{1dT} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložisku dotykovým snímačom Testo 900

$T_{2dT} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku dotykovým snímačom Testo 900

$T_{1bF} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na ložisku bezdotykovým snímačom Fluke 62 mini

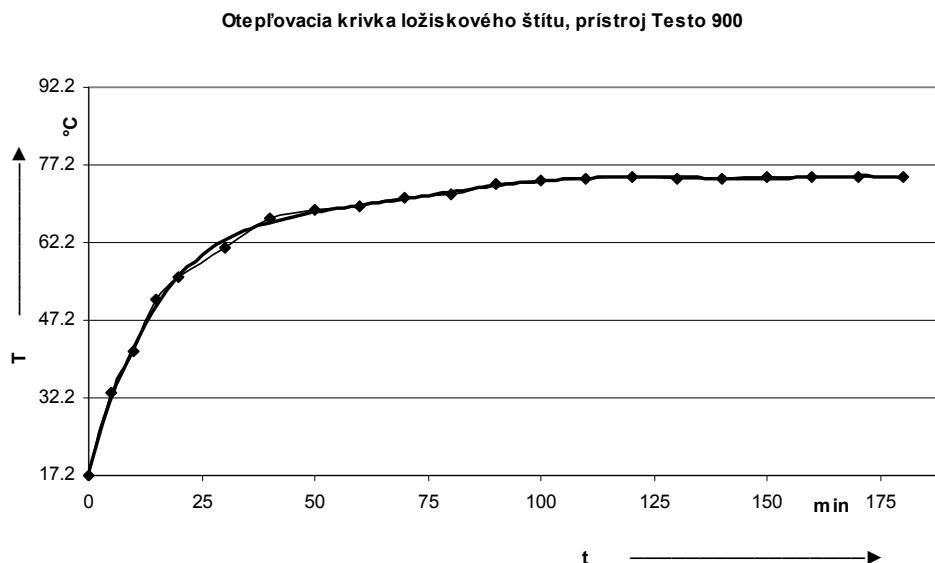
$T_{2bF} [^{\circ}\text{C}]$  - teplota na statorovom zväzku bezdotykovým snímačom Fluke 62 mini



Č. merania	čas [min]	$T_{1dM}$ [°C]	$T_{2dM}$ [°C]	$T_{1dT}$ [°C]	$T_{2dT}$ [°C]	$T_{1bF}$ [°C]	$T_{2bF}$ [°C]
1	0	23	23	17,2	17,5	17,6	18,3
2	5	35	30	33,2	26,8	29,2	21,4
3	10	44	35	41,2	33,7	34,4	24,8
4	15	51	42	51,1	45,7	38,6	28,2
5	20	56	45	55,6	56,0	41,6	30,8
6	30	60	58	61,2	68,4	45,4	34,4
7	40	65	63	66,9	74,9	49,2	38,6
8	50	71	67	68,6	78,8	51,0	47,6
9	60	74	72	69,1	80,2	54,2	51,4
10	70	75	74	70,8	82,8	55,6	52,1
11	80	75	76	71,6	84,6	55,8	52,2
12	90	76	77	73,4	85,3	57,4	52,4
13	100	76	78	74,1	85,7	57,3	52,5
14	110	76	78	74,6	85,6	57,4	52,4
15	120	77	78	74,8	85,7	57,5	52,5
16	130	77	79	74,7	85,6	58,6	52,4
17	140	77	79	74,7	85,7	58,8	52,5
18	150	77	80	74,8	86,1	57,8	52,5
19	160	77	81	74,8	86,1	58,8	52,5
20	170	77	81	74,8	86,1	58,8	52,5
21	180	77	81	74,8	86,1	58,8	52,5

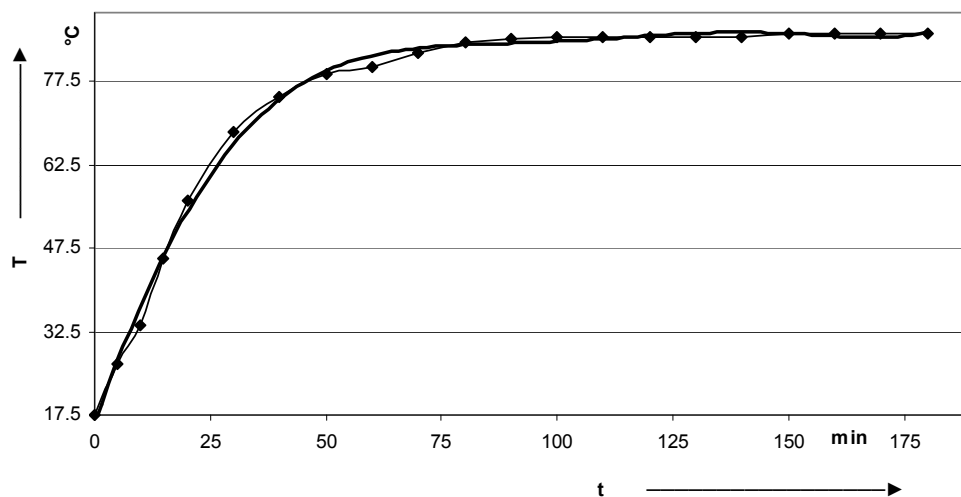
Tab. 7 - Zaznamenané hodnoty z merania č. 2

Zo získaných nameraných hodnôt znova zostrojíme príslušné grafy oteplenia vybraných častí:



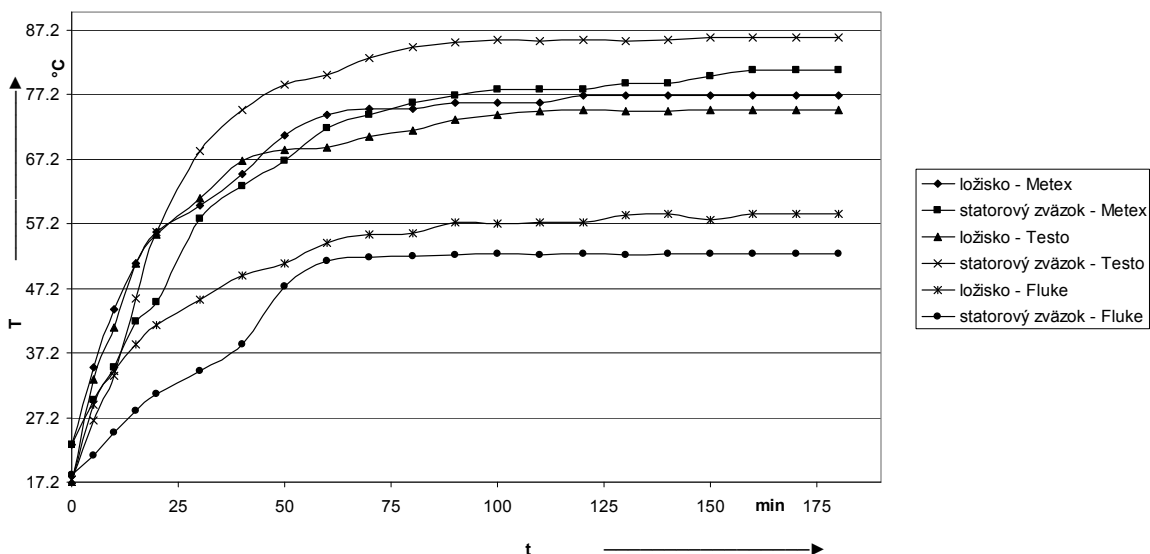
Obr. 18 - Oteplovacia krivka ložiskového štítu pri použití prístroja Testo 900, meranie č. 2

Oteplovacia krivka statorového zväzku, prístroj Testo 900

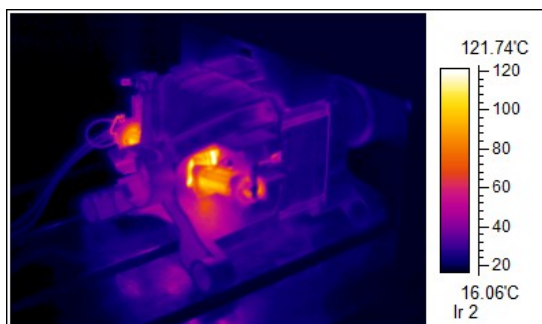


Obr. 19 - Oteplovacia krivka statorového zväzku pri použití prístroja Testo 900, meranie č.2

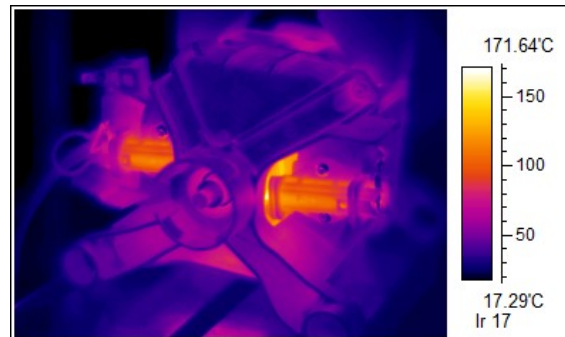
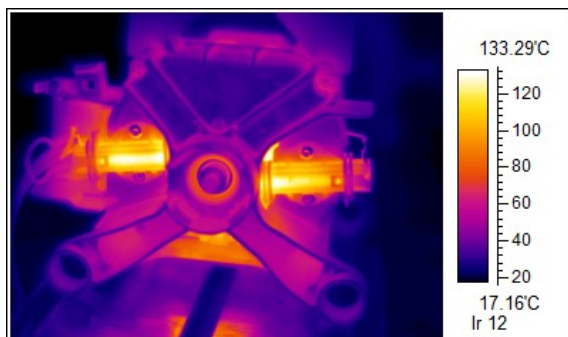
Oteplovacie krivky - meranie č. 2



Obr. 20 - Oteplovacie krivky, meranie č.2



Obr. 21 - Snímok z termokamery v čase 8:20



**Obr. 22** - Snímok z termokamery v čase 9:20

**Obr. 23** - Snímok z termokamery v čase 10:50

### Výsledky merania:

zo známej rovnice:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

môžeme znovu vypočítať okamžitú hodnotu oteplenia na jednotlivých častiach

Okamžitá hodnota oteplenia v čase  $t=60$  min s použitím Testa 900 na ložiskovom štíte:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 74,8 \cdot (1 - e^{-\frac{60}{0,630 \cdot 74,8}}) = 53,86^{\circ}C \quad 5.9$$

Okamžitá hodnota oteplenia v čase  $t=60$  min s použitím Testa 900 na statorovom zväzku:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 86,1 \cdot (1 - e^{-\frac{60}{0,630 \cdot 86,1}}) = 57,61^{\circ}C \quad 6.0$$

Výpočet časovej konštanty pre oteplenie ložiskového štítu za pomoci prístroja Testo 900:

$$\tau = 0,630 \cdot \Delta \vartheta_{\max} = 0,630 \cdot 74,8 = 47,124 \text{ min} \quad 6.1$$

tzn. že ak by stroj neodvádzal do okolia čiadne teplo, oteplil by sa o 52,66 minút na hodnotu ustáleného oteplenia.

Výpočet časovej konštanty pre statorového zväzku za pomoci prístroja Testo 900:

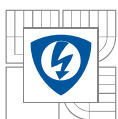
$$\tau = 0,630 \cdot \Delta \vartheta_{\max} = 0,630 \cdot 86,1 = 54,23 \text{ min} \quad 6.2$$

Oteplenie ložiskového štítu s použitím prístroja Testo 900:

$$\vartheta = \Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 = 74,8 - 17 = 57,8^{\circ}K \quad 6.3$$

Oteplenie statorového zväzku s použitím prístroja Testo 900:

$$\vartheta = \Delta \vartheta - \Delta \vartheta_1 = 86,1 - 17 = 69,1^{\circ}K \quad 6.4$$



### **Záver:**

Zo získaných výsledkov je znovu možné zostrojiť grafy oteplenia rôznymi použitými prístrojmi. Z výsledkov je znova vidieť, že najpresnejším prístrojom bola už spomínaná priemyslová sonda Testo 900. Pri bližšom skúmaní hodnôt je opäť vidieť rozdiel medzi hodnotami pri použití jak dotykových, tak aj bezdotykových prístrojov. Pri porovnaní hodnôt použitím prístroja Metex 386D a Testo 900, sú hodnoty rozdielu ustálených oteplení v rozmedzí od 2 do 5 °C. V tomto meraní sa hodnota ustáleného oteplenia ložiskového štítu líši o 2,2 °C a hodnota ustáleného oteplenia na statorovom zväzku o 5,1 C. Ako vysvetlenie týchto odlišností poslúži rovnako ako v minulom meraní fakt, že dotykový prístroj ma nevýhodu v dotyku a nedokonalom pritlačení snímača na meranú plochu, ktorá môže spôsobiť práve túto odlišnosť. Pri skúmaní hodnôt nameraných bezdotykovým snímačom Fluke, vidíme veľké odlišnosti s dotykovými prístrojmi. V prípade ustáleného oteplenia ložiska sa hodnota od bezdotykových prístrojov líši v priemere o 19°C a v prípade ustáleného oteplenia statorového zväzku dokonca o viac ako 28°C. Táto chyba prístroja sa prejavila jak v minulom, tak aj v tomto meraní. Pri tomto meraní môžeme opäť konštatovať, že použitý elektrický stroj nikdy v prevádzkovej činnosti nedosahuje hodnôt ako pri našom meraní. Prevádzková doba pračky sa pri najdlhšom režime pohybuje v rozmedzí od 60-90 minút, v ktorej sa motor otáča otáčkami od 200 do 1200 ot/min. Chod motora je prerušovaný a počas funkcie sa niekoľko krát zastaví, kedy dochádza k ochladzovaniu motora. Maximálnych otáčok dosahuje pri žmýkaní a v tomto režime zotrúva maximálne 5 minút. Ako som už spomínal, napodobiť chod elektrického motora slúžiaceho ako pohon bubna v pračke, je veľmi zložitá a vyžaduje maximálnu znalosť programovania a funkcie pračky.

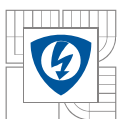
Hodnota časovej konštanty ložiskového štítu pri použití prístroja Testo 900 je rovná 47,1 min. Zostrojená hodnota časovej konštanty (obr.14, časť prílohy) v tomto prípade je rovná 24 min.

## **6 MODELOVANIE ZADANÉHO ELEKTRICKÉHO PRÍSTROJA**

Zadaným elektrickým prístrojom bol jednofázový komutátorový motor značky Muster. Ďalšou časťou práce je vytvorenie teplotného modelu zadaného elektrického motoru. Vytvorenie teplotného modelu zahŕňa namodelovanie stroja v grafickom rozhraní - Autodesk Inventor, prevedenie modelu do programu Ansys Workbench, zadanie vstupných podmienok v programe a samotný výpočet a zhotovenie modelu.

Modelovanie motoru v programe Autodesk Inventor pozostávalo zo štyroch častí:

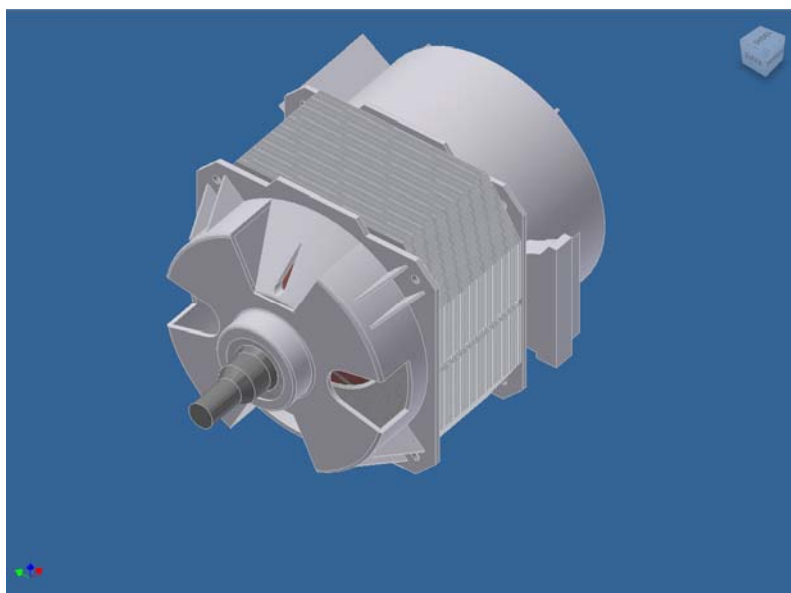
1. *časť predného krytu* – kryt má valcový charakter s rôznymi skoseniami, otvormi, rebrami a hranami. Taktiež obsahuje v prednej časti otvor pre uchytenie ložiska rotoru.
2. *statorová časť* – stator pozostáva z 84. pospájaných plechov o celkovej výške 55 mm. Materiál statoru je oceľ.
3. *časť zadného krytu* – z konštrukčného hľadiska veľmi komplikovaný komponent s rôznymi výklenkami, otvormi, skoseniami a rebrovaním. Má valcový charakter.



V zadnej časti sa nachádza otvor pre vloženie ložiska a taktiež svorkovnica pre prívod napätia.

4. *rotorová časť* – rotor motoru valcového charakteru ktorý má celkovú dĺžku 201 mm. Obsahuje predné a zadné ložisko, komutátor a rotorové vinutie. Materiál statoru je opäť oceľ.

Modelovanie stroja prebehlo v programe Autodesk Inventor. Každá časť bola vytvorená zvlášť v prostredí „Norma.ipt“, ktorá slúži na vytváranie 2D parametrického modelu a následne prevedenie do 3D modelu. Spojenie častí do jedného celku prebiehalo v prostredí „Zvarenec“, ktorá má príponu súboru .iam a boli použité príkazy "väzba". Vzniknutý 3D model stroja je na Obr. 24.

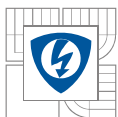


**Obr.24** – Namodelovaný motor Muster v Inventore 2009

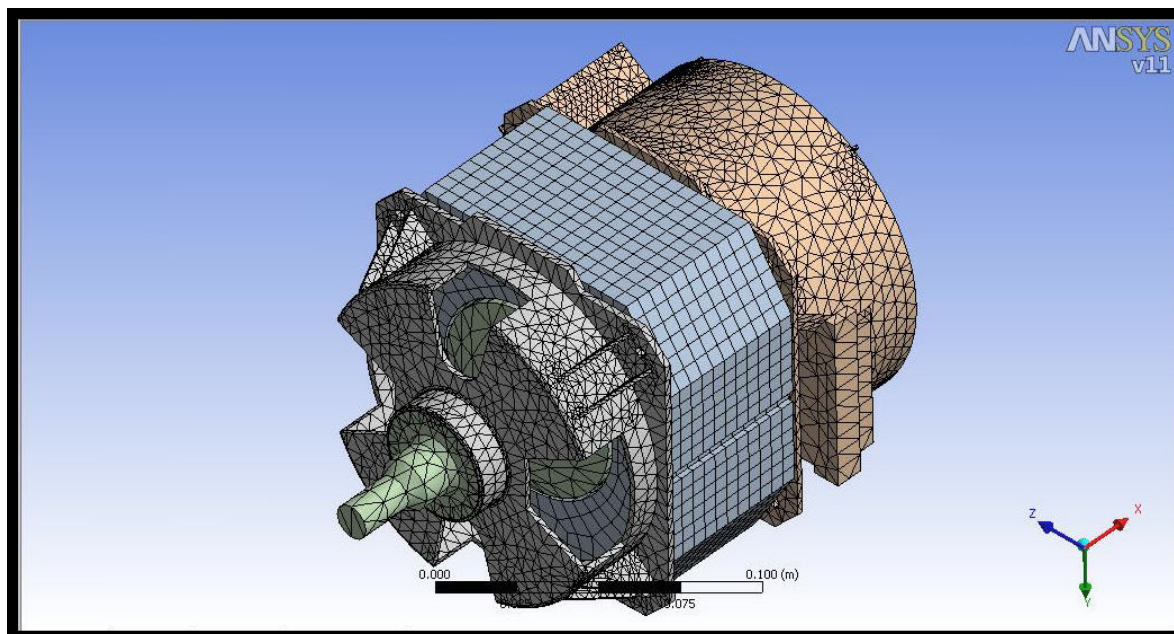
## 7 ROZLOŽENIE TEPLoty ELEKTRICKÉHO PRÍSTROJA PROGRAMOM ANSYS V.12

Program Ansys Workbench nám umožňuje rozložiť teplotu na zadanom objekte pomocou metódy konečných prvkov. Po vložení geometrie z programu Autodesk Inventor s príponou súboru .iam, nám program Ansys dovoľuje vybrať si niektorú z ponúkaných analýz. Rozloženie teploty na našom motore zahrňovala analýza typu „Transient Thermal“. Pre vykonanie analýzy je ale najskôr potrebný Mesh modelu (obr. č. 25). „Transient Thermal“ analýza v preklade znamená „dočasná“ alebo „krátkodobá“ analýza. Po zadaní vstupných podmienok (teplota na vybraných častiach motora - rotor, ložiskový štít predný/zadný, statorový zväzok) a šíreniu tepla do programu, program vypočíta rozloženie teploty motora na stroji. Po ukončení riešenia nám vznikne na motore teplotné pole, ktoré je charakteristické inými farbami. Modrá farba označuje

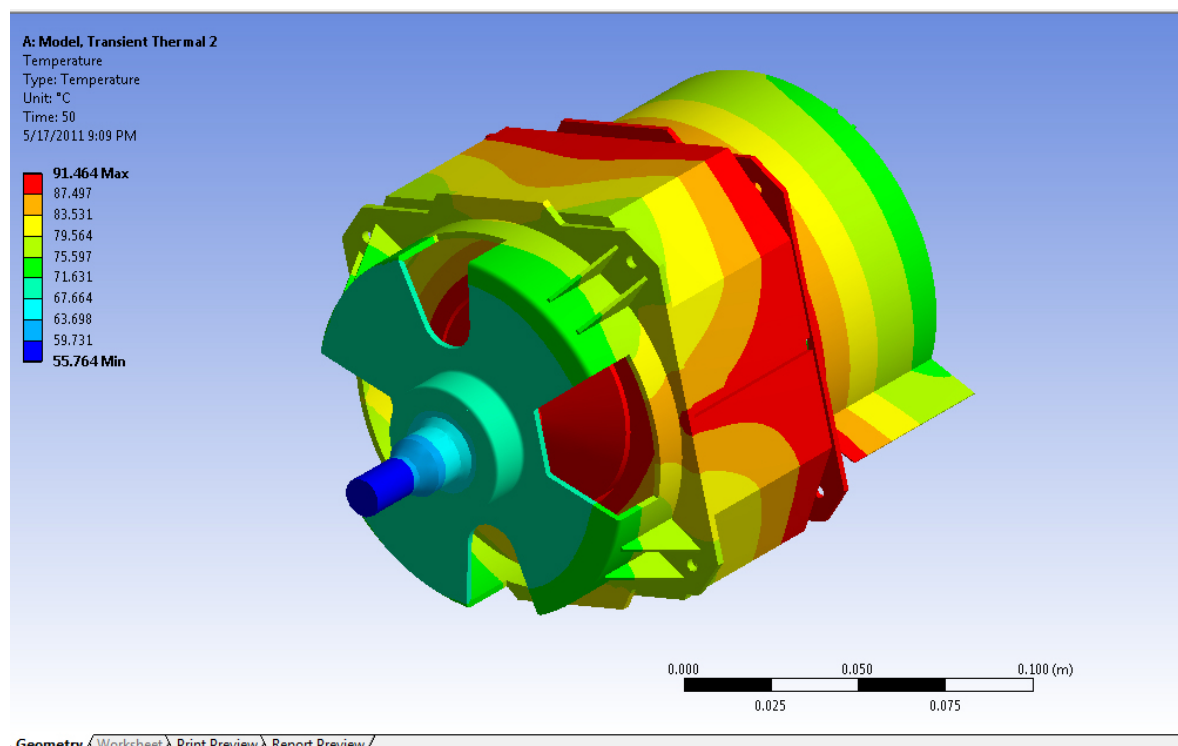




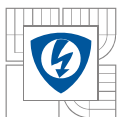
teplotu 55,°C a červená 91,4°C. Škála medzi týmito hodnotami odpovedá teplotám motora. Rozloženie teploty sa nachádza na obrázku č. 26. Ďalšie obrázky je možné nájsť v časti *Prílohy*.



**Obr. 25** – Celkový Mesh motoru Muster



**Obr. 26** – Teplotný model elektrického stroja



## 8 ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV MERANIA VŠETKÝMI METÓDAMI

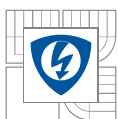
V poslednej časti bakalárskej práci sa pokúsim zhrnúť a vyhodnotiť doterajšie výsledky meraní. Práca zahŕňa dve merania a jednu počítačovú teplotnú simuláciu.

Meranie s označením č.1, sa konalo 28.3.2011 v laboratóriu strojov na Fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií pod vedením a dohľadom vedúceho práce doc. Ing. Františka Veselku, CSc s technickou podporou p. Zdenka Lišky. Meranie s časovým rozsahom 180 minút, zahŕňovalo trvalé zaťaženie elektrického motoru konštantným protimomentom a konštantným napätím. Elektrický motor pred meraním podstúpil spomínanú opravu zadného guľíkového ložiska a celkovú kontrolu všetkých častí stroja. V priebehu merania som odčítaval nameranú teplotu na dvoch zvolených bodoch stroja z dotkových a bezdotkových snímačov teploty a zaznamenával snímky z termokamery na priloženú pamäťovú kartu. Vo vypracovaní merania č. 1 som vypočítal príslušné oteplenie použitými prístrojmi. V bode č. 2 - "statorový zväzok" sa hodnota ustáleného oteplenia pri použití prístroja Testo 900 zastavila na hodnote 91,3°C. Z tejto hodnoty sme vypočítali oteplenie statorového zväzku (výpočet 5.8), ktoré označuje rozdiel teplôt medzi hodnotou ustáleného oteplenia a počiatočnou teplotou. V prípade statorového zväzku je oteplenie rovné 72,8°K. Pri použití prístroja Metex, bola odčítaná ustálená hodnota statorového zväzku 81°C, z čoho vypovedá oteplenie rovné 58°K. V prípade použitia bezdotkového prístroja Fluke sa hodnota ustáleného oteplenia statorového zväzku rovná 48,5°C a jeho oteplenie je 28,9 °K. Popri meraní klasickými spôsobmi som taktiež vyžil možnosť snímania celého objektu termokamerou SAT. Z vyfotografovaných záberov vidíme, že ustálené oteplenie statorového zväzku je v rozmedzí od 60°C do 80°C (časť prílohy, obr. č. 11)

Pri porovnaní hodnôt ustáleného oteplenia všetkými spôsobmi vidíme, že ako najpresnejší prístroj pri meraní sa ukázala dotková priemyslová sonda Testo 900. Presnosť tejto sondy udáva výrobca 0,9°C, takže môžeme konštatovať, že pri relatívne dobrej presnosti prístroja sa počas trvalého zaťažovania elektrického stroja zahrial statorový zväzok na hodnotu 91,3°C. Najmenej presným prístrojom pri meraní sa ukázal bezdotkový snímač Fluke. Nameraná hodnota ustáleného oteplenia 48,5°C neodpovedá skutočnej hodnote teploty na konci merania. Táto hodnota je príliš malá a motor pracujúci pri takejto záťaži a otáčkach tejto hodnoty bez účinného chladenia nedosahuje. Pri sledovaní snímku z termokamery SAT vidíme narastanie teploty počas merania na všetkých častiach elektrického stroja. Taktiež zreteľne sledujeme rozloženie teploty na častiach motora a hodnoty teplôt odčítavame na stupnici v pravo na snímku. Hodnoty z termokamery su len orientačné, pretože je termokamera v tomto prípade závislá na viacerých faktoroch. Jedným z nich je nastavenie emistivity, ktorá sa prispôbuje podľa nameranej hodnoty iným prístrojom. Ďalším faktorom môžu byť rôzne odlesky a odrazy, ktoré zasahujú do výsledkov merania. Hodnota oteplenia statorového zväzku pri použití termokamery sa pohybuje v rozmedzí od 40 °K do 60°K.

Za najpresnejšiu hodnotu oteplenia statorového zväzku môžeme teda brať do úvahy údaj 72,8°K pri použití prístroja Testo 900. Získané hodnoty oteplenia od výrobcu tohto elektromotoru nám dovoľujú porovnať namerané hodnoty z merania č. 1 s nameranými hodnotami priamo od



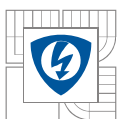


výrobcu stroja. Ako som spomínal, elektromotor je určený pre využitie v pračke a preto výrobca udáva hodnoty oteplenia priamo pri použití tohto motora v pračke BOSCH WAE 24463TR / 14 , F10 - 1200 Relaunch 2009. Meranie prebiehalo v tzv. čiernej skrini, kedy je motor zabudovaný do skrine a simuluje najťažšie podmienky pre chod pračky. Napájanie stroja bolo 254V, náplň pračky 3,5 kg, zvolený program pračky 60°C Intensive - 3 cykly. Maximálne oteplenie satorového zväzku dosiahol elektromotor v druhom cykle a to konkrétne 87,7 °K. Sice je možné matematicky zrovnať hodnoty oteplenia z merania č. 1 a merania výrobcu, ale po teoretickej stránke toto zrovnanie možné nie je. Zabudovanie motora do pračky ktorá je uzavretá v čiernej skrini simulovať v podmienkach laboratória nie je možné. Takáto konštrukcia spôsobuje zvýšenie oteplenia častí stroja a narozdiel od podmienok pri meraní č. 1, nedochádza pri meraní ku ochladzovaniu stroja a minimálnemu odvodu tepla do okolia. Taktiež zvolený program pračky a záťaž bubna neodpovedá podmienkam spustenia elektromotoru pri meraní č. 1. Preto nie je možné zrovnávať tieto hodnoty a uvádzam ich ako doplnok ku výsledkom práce.

V prípade meraného bodu č. 1 - "ložiskový štít" musíme brať do úvahy spomínanú opravu práve ložiska umiestneného v zadnom štíte. Nové ložisko od výrobcu ZKL Brno s označením 6202 spoľahlivo nahradilo stávajúce ložisko. Musíme ale brať do úvahy, že demontáž motora, výmena ložiska a následná montáž stroja nám nikdy nezaručí pôvodné vlastnosti stroja, ktorý pochádza z výrobnéj linky závodu. Prípadné nezrovnalosti sa mohli odzrkadliť v otelení ložiska a preto tieto hodnoty nemôžeme považovať za definitívne. Pri meraní ložiskového štítu som použil rovnaké prístroje ako pri meraní oteplenia satorového zväzku. Pri použití prístroja Testo 900 sa hodnota ustáleného otelenia rovná 83,6°C. Keďže počiatočná teplota ložiskového štítu bola 18,4°C, veľkosť oteplenia je v tomto prípade 65,2°K (výpočet 5.7). Dotykový prístroj Metex ukazoval hodnotu ustáleného otelenia 84°C. Prístroj ale nameral počiatočnú teplotu v čase merania 0 min 22°C, takže oteplenie pri použití v tomto prípade je rovné 62°K. Bezdotykový prístroj Fluke rovnako ako pri meraní teploty na satorovom zväzku ukazoval hodnoty ktoré sa od ostatných prístrojov líšia. Ustálené oteplenie v tomto prípade nadobudlo hodnoty 63,6°C a veľkosť oteplenia sa rovná 44,2°K. Snímok z termokamery v čase 169 minút od začiatku merania (obr. 19) ukazuje rozloženie teploty na zadnom štíte elektromotoru. Pri detailnom pozorovaní ložiskového štítu vidíme, že ustálená teplota sa podľa stupnice pohybuje medzi 70°C až 80°C.

Pri sledovaní priebehov oteplenia ložiskového štítu je z použitých prístrojov najpresnejším znovu priemyslová sonda Testo 900. Pri použití tohto prístroja dosiahlo ložisko v 180. minúte merania teplotu 86,6°C. Táto teplota je dosť vysoká a nepriaznivo ovplyvňuje rozloženie teploty na celkom elektrickom stroji. Takto vysoká teplota je spôsobená jak veľkou rýchlosťou otáčania hriadeľa elektromotoru tak veľkým trením guľičiek vo vnútri ložiska. Jedným z aspektov takto vysokej teploty môže taktiež byť aj prenos tepla z komutátoru stroja. Komutátor podľa snímku z termokamery (obr. 19) vykazoval teplotu počas chodu na hranici 140°C, čo nepriaznivo ovplyvňuje teplotu ložiska len niekoľko centimetrov vzdialeného.

Meranie č. 2 prebiehalo 25.4.2011 na rovnakom mieste ako predošlé meranie. V tomto prípade boli podmienky spustenia identické s podmienkami pri predchádzajúcom meraní, merané body taktiež ostali zachované a nezmenili sa ani snímače teploty. Cieľom tohto merania bolo znovu získať hodnoty ustáleného oteplenia z obidvoch bodov, ale za použitia odlišného zadného



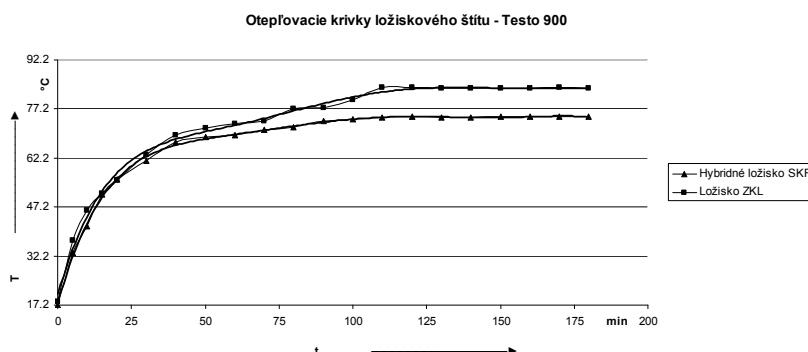
ložiska stroja. Na žiadosť vedúceho ústavu Ing. Ondřeja Vítka, Ph.D. došlo k výmene ložiska ZKL 6202 za hybridné ložisko od spoločnosti SKF. Vypracovanie druhého merania znovu prinieslo výsledky ktoré je možné porovnať s prvým meraním.

Na meranom bode č. 2 - satorový zväzok, ustálené oteplenie pri použití priemyslovej sondy Testo 900 dosiahlo hodnoty 86,1 °C. Príslušné vypočítané oteplenie dosiahlo hodnoty 69,1 °K. Pri použití snímača teploty Metex sa teplota ustálila na hodnote 81°C a vypočítané oteplenie sa rovná 58°K. Pri použití bezdotykového snímača teploty Fluke je hodnota ustáleného oteplenia rovná 52,5°C a vypočítaná hodnota oteplenia je 34,2°K.

Pri porovnaní nameraných a vypočítaných hodnôt merania č. 2 s prvým meraním, vidíme malé odlišnosti. Identické hodnoty oteplenia pri použití prístroja Metex napovedajú, že obidve merania prebiehali správne. Rozdiel oteplení satorového zväzku pri použití prístroja Testo 900 v meraní č. 1 a č. 2 je 3,7°K. Tento rozdiel môže byť spôsobený chybou merania alebo nepresnosťou prístroja. Pri porovnaní hodnôt oteplenia bezdotykového snímača Fluke, sa meranie č. 1 a č. 2 líšia o 5,3°K. Rozdiel môže byť znova spôsobený nepresnosťou prístroja, ako je už známe z minulých záverov.

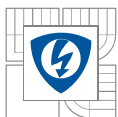
Meraný bod 1 priniesol hodnoty oteplenia, ktoré je možné zrovnávať s hodnotami pri použití klasického ložiska ZKL. Ustálené oteplenie pri použití prístroja Testo 900 dosiahlo v tomto prípade hodnoty 74,8°C. Príslušné oteplenie ložiskového štítu je 57,8°K. V prípade použitia prístroja Metex, je ustálená hodnota oteplenia rovná 77°C a oteplenie je 54°K. Posledný použitý prístroj bol bezdotykový snímač Fluke a hodnota ustáleného oteplenia v tomto prípade je rovná 58,8°C a oteplenie 41,2°K.

Pri porovnaní oteplenia ložiska ZKL a hybridného ložiska SKF vidíme rozdiely. Hodnota oteplenia pri použití hybridného ložiska je nižšia ako hodnota oteplenia klasického ložiska. Pri porovnaní ustálenej hodnoty oteplenia napr. pri použití prístroja Testo 900, je hybridné ložisko chladnejšie oproti klasickému o 8,8°C. Pri porovnaní tej istej hodnoty s prístrojom Metex, je hybridné ložisko chladnejšie o 7°C. (obr. 27)



**Obr. 27** – Porovnanie oteplenia ložiskového štítu pri použití rozličných ložísk

Z ekonomického hľadiska, je použitie hybridných ložísk v elektrických motoroch nerealizovateľné. Cena hybridného ložiska je o 425% vyššia oproti ložisku klasickej konštrukcie. Cena celej pračky by sa v tomto prípade predražila o 50%. V prípade, že technológie výroby hybridných ložísk a cena kremíku na trhu dovoľia aplikáciu tohto druhu zariadení na prenos sily, určite si hybridné ložiská nájdu svoje uplatnenie v tomto odvetví.



## Záver

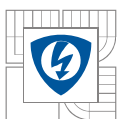
Prácou na bakalárskej práci som si mal možnosť zistiť a overiť si poznatky z merania teploty na elektrických strojoch. Mal som možnosť nahliadnuť do problematiky vzniku tepla, merania tepla, či už dotykového, alebo bezdotykového, objasnil som si teóriu točivých elektrických prístrojov, ako sú: komutátorové motory a vznik tepla na nich. Vysvetlil som problematiku vzniku tepla stratami a oteplenie stroja.

V prvej časti práce sa venujem problematike tepla, popisujem vznik tepla, šírenie tepla a vznik tepla v točivých elektrických strojoch. V tejto stati taktiež prvýkrát spomínam vybrané časti elektrického stroja na ktorých budem sledovať oteplenie a popisujem ich základné vlastnosti. V ďalšej časti sa konkrétne venujem meraniu, meraniu teploty a rozoberám problematiku bezdotykového a dotykového merania teploty. Taktiež popisujem prístroje ktoré sa používajú k meraniu teploty a zoznamujem sa komutátorovým motorom, ktorý bude predmetom ďalšieho skúmania práce. V tejto časti taktiež nevynechávam oteplenie stroja.

Nasleduje praktická, druhá časť práce, kedy popisujem zvolený elektrický stroj, meranie oteplenia vybraných častí elektromotora, popisujem návrh meracej sústavy a prístroje ktoré budem k meraniu používať. Ďalším bodom práce je samostatné meranie, program merania, spracovanie výsledkov merania, výpočty a vyhodnotenie daného merania. V tejto časti práca obsahuje príslušné grafy otepľovacích kriviek obidvoch prevedených meraní, reálne fotografie z merania a taktiež fotografie celej meracej sústavy a snímky z termokamery.

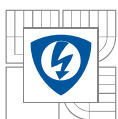
Dôležitým bodom práce je časť nasledujúca po praktickej časti. Venujem sa modelovaniu motora v grafickom rozhraní, popisujem výrobu modelu elektromotora a spomínam základné funkcie použitých programov. Práca zoznamuje s vlastnosťami programov Autodesk Inventor a Ansys Workbench. Výsledkom tejto časti je vyhotovenie 3D modelu motora, následné prevedenie do programu Ansys a teplotný model elektrického stroja, ktorý je pre lepšiu orientáciu farebne rozlíšený.

V poslednej časti bakalárskej práce sa rozsiahle venujem zhodnoteniu výsledkov merania všetkými použitými metódami. Snažím sa popísať získané hodnoty a porovnávať jak obidve merania, tak namerané hodnoty v laboratóriu s hodnotami udávanými od výrobcu. Práca spracováva výsledky meraní, poukazuje na vzniklé chyby merania. V neposlednej rade sa zaoberám ekonomickým použitím hybridného ložiska v elektromotore v pračke a budúcim využitím ložísk v elektrických strojoch.

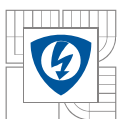


## Citácie

- 1 - CHUDÝ, Vladimír, PALENČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin.  
*Meranie technických veličín*. Vydavateľstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2. 376s.
- 2 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřicí obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 180 s.
- 3 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřicí obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 181 s.
- 4 - trojný bod [online]. [cit.2011-03-19]. Dostupné z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Trojn%C3%BD\\_bod](http://cs.wikipedia.org/wiki/Trojn%C3%BD_bod)
- 5 - BEJČEK, Ludvík. *Měření neelektrických veličín*. Brno: VUT, 1992. str.84
- 6 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřicí obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 181 s.
- 7 - Motory Maxon [online]. [cit.2011-05-05]. Dostupné z WWW:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37743](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37743)
- 8 - KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony* . Brno : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT, 70s.
- 9 - MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje III* . Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1975. 194-195s.
- 10 - elektromotor [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- 11 - guľičkové ložisko bod [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Kuli%C4%8Dkov%C3%A9\\_lo%C5%BEisko](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kuli%C4%8Dkov%C3%A9_lo%C5%BEisko)
- 12 - guľičkové ložisko bod [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
<http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/1-zakladni-vypocty>
- 13 - Hybridné ložisko [online]. [cit.2011-04-10]. Dostupné z WWW:  
[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1\\_23\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1_23_1)
- 14 - MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje III* . Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1975. 194-195s.
- 15 - Kremík [online]. [cit.2011-05-05]. Dostupné z WWW:  
[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1\\_23\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1_23_1)
- 16 - CHUDÝ, Vladimír, PALENČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin.  
*Meranie technických veličín*, Vydavateľstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2. 453 s.
- 17 - SVOBODA, Emanuel, BAKULE, Roman . *Molekulová Fyzika* . Praha : Academia, 1992. 36 s.
- 18 - ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličín*, Praha: SNTL, 1983, 75 s.



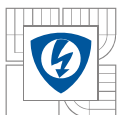
- 19 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřící obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 183 s.
- 20 - Snímače teploty [online]. [cit.2011-05-06]. Dostupné z WWW:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34041](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34041)
- 21 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřící obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 187 s.
- 22 - DUNAY, Gejza. *Elektrické meranie mechanických veličín*, Košice: VŠT, 1985, 187 s.
- 23 - Meranie teploty v priemysle (3). AT&P Journal. Január 2002. ročník 4. číslo 1. str. 46
- 24 - VAVRIČKA, Roman, *Termovizní zobrazovací systémy*, VVI, 2004, ročník 13, č. 3. str.5
- 25 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřící obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 217 s.
- 26 - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřící obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 224-228s.
- 27 - CHUDÝ, Vladimír, PALENČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin.  
*Meranie technických veličín*. Vydavateľstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2. 476 s.
- 28 - MRAVEC, Rudolf, *Elektrické stroje a přístroje 2*. VTEL Bratislava, 1966, 608-609 s
- 29 - MRAVEC, Rudolf, *Elektrické stroje a přístroje 2*. VTEL Bratislava, 1966, 611 s
- 30 - KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony* . Brno : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT, 83-84s.
- 31 - MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje III* . Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1975. 36s.
- 32 - RÁČEK, Vladimír, *Automatizované Elektrické Pohony*. TNUNI, Trenčín, 1998, 24 s
- 33- MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje III* . Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1975. 194-195s.



## Literatúra

- [1] - ĎAĎO, Stanislav, KREIDL, Marcel . *Senzory a měřicí obvody* . Praha : ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9
- [2] - HORÁK, Zdeněk, KRUPKA, František . *Fyzika, Svazek 1* . Praha : SNTL, 1976. 422 s.
- [3] - trojný bod [online]. [cit.2011-03-19]. Dostupné z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Trojn%C3%BD\\_bod](http://cs.wikipedia.org/wiki/Trojn%C3%BD_bod)
- [4] - SVOBODA, Emanuel, BAKULE, Roman . *Molekulová Fyzika* . Praha : Academia, 1992. 275 s. ISBN 80-200-0025-9
- [5] - MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje III* . Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Alfa, 1975. 313s.
- [6] - KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony* . Brno : Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT, 123s
- [7] - BEJČEK, Ludvík. *Měření neelektrických veličin*. Brno: VUT, 1987. str. 120 s
- [8] - CHUDÝ Vladimír, PALENČÁR, Rudolf, KUREKOVÁ, Eva, HALAJ, Martin: *Meranie technických veličín*. Vydavateľstvo STU, 1999. ISBN 80-227-1275-2. 688 s.
- [9] - ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličín*. Praha: SNTL, 1983, 325 s.
- [10] - elektromotor bod [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [11] - guľičkové ložisko bod [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
<http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/1-zakladni-vypocty>
- [12] - guľičkové ložisko bod [online]. [cit.2011-03-26]. Dostupné z WWW:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Kuli%C4%8Dkov%C3%A9\\_lo%C5%BEisko](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kuli%C4%8Dkov%C3%A9_lo%C5%BEisko)
- [13] - Hybridné ložisko [online]. [cit.2011-04-10]. Dostupné z WWW:  
[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1\\_23\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1_23_1)
- [14] - trenie [online]. [cit.2011-04-10]. Dostupné z WWW:  
[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1\\_0\\_35](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1_0_35)
- [15] - DUNAY, Gejza. *Elektrické meranie mechanických veličín*. Košice: VŠT, 1985, 320 s.
- [16] - Jednosmerný stroj [online]. [cit.2011-04-15]. Dostupné z WWW:  
[http://sk.wikipedia.org/wiki/Jednosmern%C3%BD\\_stroj](http://sk.wikipedia.org/wiki/Jednosmern%C3%BD_stroj)
- [17] - MRAVEC, Rudolf, *Elektrické stroje a přístroje 2*. VTEL Bratislava, 1966, 728 s
- [18] - RÁČEK, Vladimír, *Automatizované Elektrické Pohony*. TNUNI, Trenčín, 1998, 112 s
- [19] - VESELKA, František, *Electrical Machines innovation for household appliances*. 2001
- [20] - Motory Maxon [online]. [cit.2011-05-05]. Dostupné z WWW:  
[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37743](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37743)
- [21] - Kremík [online]. [cit.2011-05-05]. Dostupné z WWW:  
[http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1\\_23\\_1](http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=cs&maincatalogue=1&newlink=1_23_1)
- [22] - Meranie teploty v priemysle (3). AT&P Journal. Január 2002. ročník 4. číslo 1. str. 46





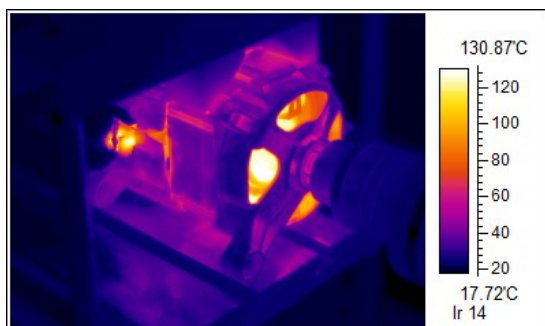
## Prílohy

Tab.1 – špecifikácie termokamery SAT (v angličtine)

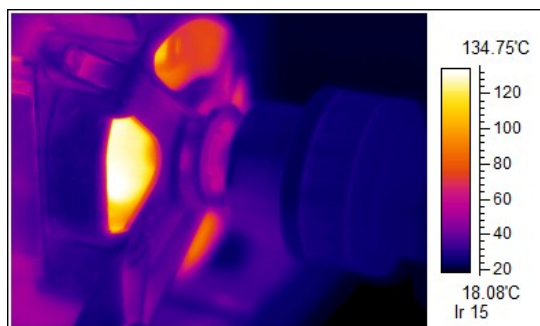
### HY6800 SPECIFICATIONS

Description	Characteristics	Performance
Detector	Type	Monolithic Resistive bolometer UFPA
	Spectral range	8 ~ 14 $\mu\text{m}$
	Resolution	320×240
	Fill Factor	>80%
Imaging Performance	NETD	0.08°C @ 30°C
	Lens / Focusing	50mm; electronic focus
	Spectral resolution	1.3 mrad
	Frame rate	50 Hz
	Video output	Pal / NTSC (optional)
Image presentation	BW and pseudocolor image display	256 level, Yes
Features	Image freeze	Run or Freeze
	Image storage	128 MB Flash card
Measurement	Temperature range	-40 to 600°C, Standard, -10 to 1000°C -40 to 2000°C, Optional
	Accuracy	$\pm 2^\circ\text{C}$ or $\pm 2\%$
	Multi Spot	4 points simultaneously
Analysis Function	Temperature Capture	Highest or Lowest Temperature
	Line Analysis	Analyse Temperature distribution on the line
	Areas Analysis	Analyse Temperature distribution in the area
	Isothermal	Display the same temperature area in sharp colour
	Temperature Alarm	When the max or min temperature is higher or lower than the preset value
	Voice Annotation	16 sec of voice annotation can be saved with each image
	Four Image Display	Display FOUR images simultaneously
	Image Zooming	Zoom in or out 8x Times
Software	Software	Report Generation
Environmental Specification	Operating temperature range	-25°C ~ 50°C
	Storage temperature range	-40°C ~ 70°C
	Vibration	20g
	Shock	2g

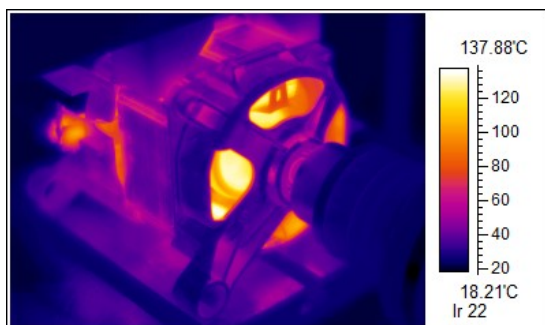
### Maranie č. 1 - dodatočné fotografie z termokamery



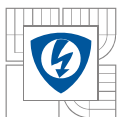
Obr. 1 - Snímok z termokamery v čase 11:00



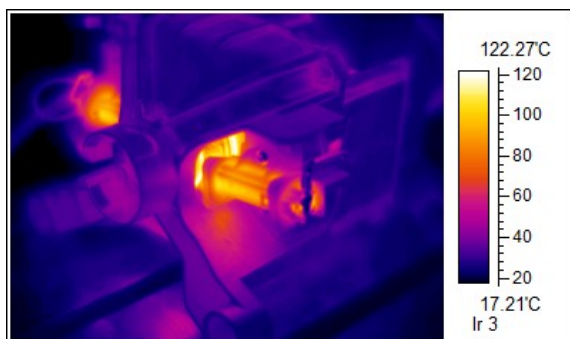
Obr. 2 - Snímok z termokamery v čase 11:00



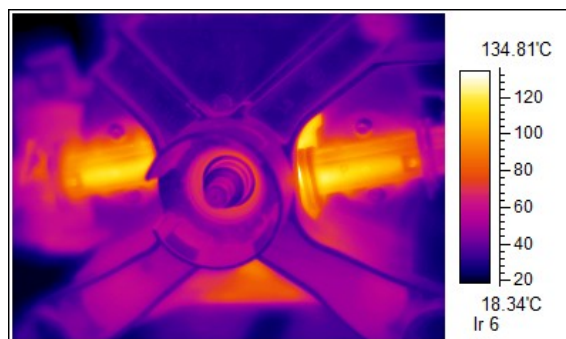
Obr. 3 - Snímok z termokamery v čase 12:00



## Maranie č. 2 - dotatočné fotografie z termokamery



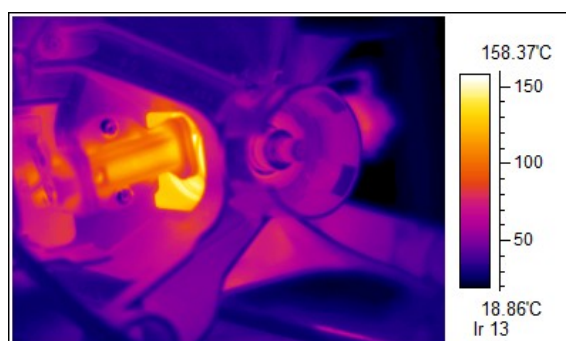
Obr. 4 - Snímok z termokamery v čase 8:20



Obr. 5 - Snímok z termokamery v čase 8:50



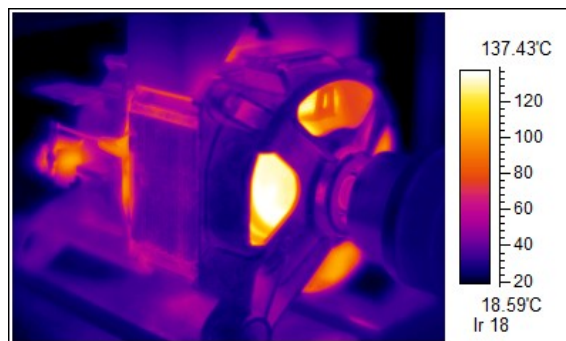
Obr. 6 - Snímok z termokamery v čase 8:50



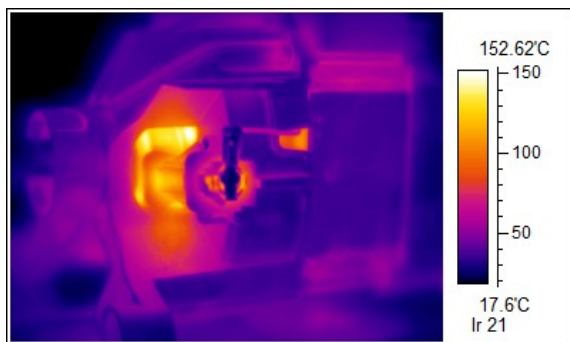
Obr. 7 - Snímok z termokamery v čase 9:20



Obr. 8 - Snímok z termokamery v čase 9:20



Obr. 9 - Snímok z termokamery v čase 10:20



Obr. 10 - Snímok z termokamery v čase 10:50





### Motor characteristics

constant voltage:

Sample	Field	Direction of rotation	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Current [A]	Voltage [V]	Output pwr [W]	Input pwr [W]	Efficiency	cos $\phi$
U - 2845 *	Full	cw	0.20	14814	2.35	229.7	519.9	308.1	0.593	0.962
		cw	1.0	7724	5.45	227.7	809.9	1080.3	0.750	0.871
		ccw	1.0	7800	5.46	227.6	815.0	1096.9	0.743	0.884

constant speed:

Sample	Field	Direction of rotation	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Current [A]	Voltage [V]	Output pwr [W]	Input pwr [W]	Efficiency	cos $\phi$
n (const.) U-2845	Full	cw	1.0	696	6.01	142.6	72.8	344.2	0.212	0.401
		ccw	1.0	693	5.21	130.4	72.5	266.1	0.272	0.392

constant voltage:

Sample	Field	Direction of rotation	Torque [Nm]	Speed [rpm]	Current [A]	Voltage [V]	Output pwr [W]	Input pwr [W]	Efficiency	cos $\phi$
60V	Full	cw	0.01	6829	1.06	60.1	7.1	56.7	0.125	0.893
80 V	Full	cw	0.1	5128	1.65	79.8	53.5	108.6	0.493	0.825
100 V	Full	cw	0.1	7326	1.67	99.8	76.9	152.3	0.504	0.914
120 V	Full	cw	0.2	6746	2.15	119.5	140.3	230.1	0.610	0.896

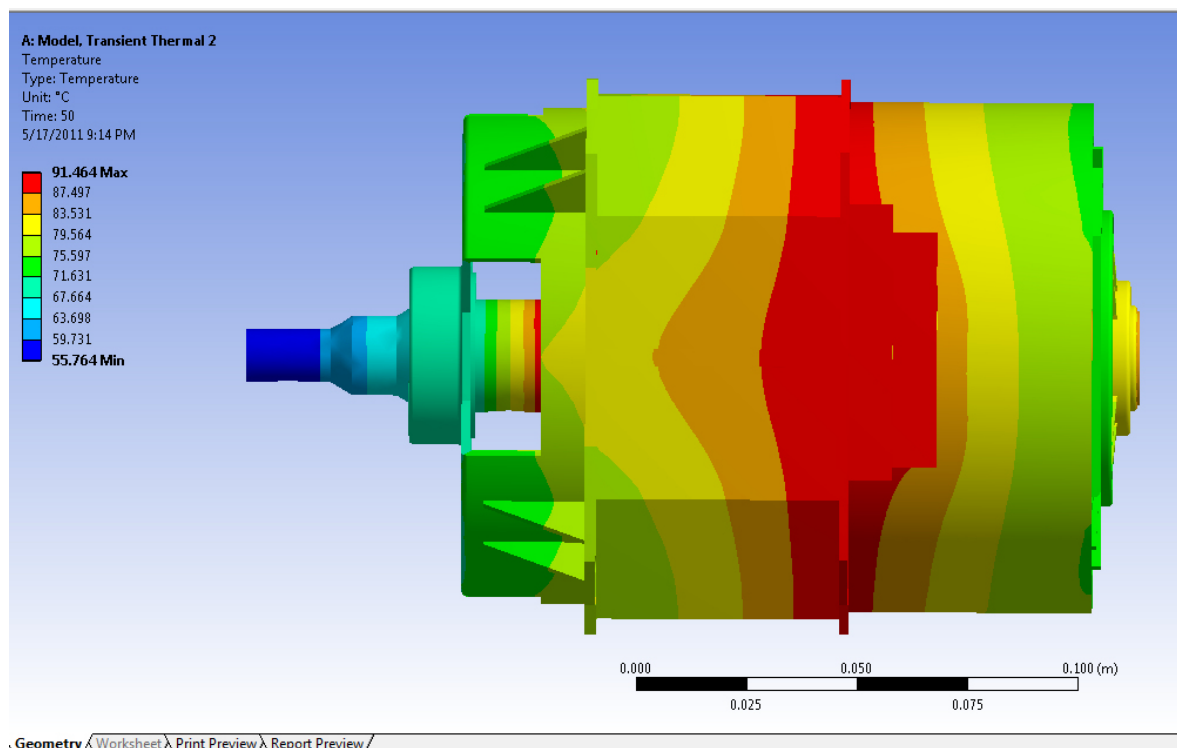
### Stator and rotor resistance

Sample	stator full [Ω]	rotor [Ω]	Ambient [°C]
U-2845	0.885	1.457	25.0

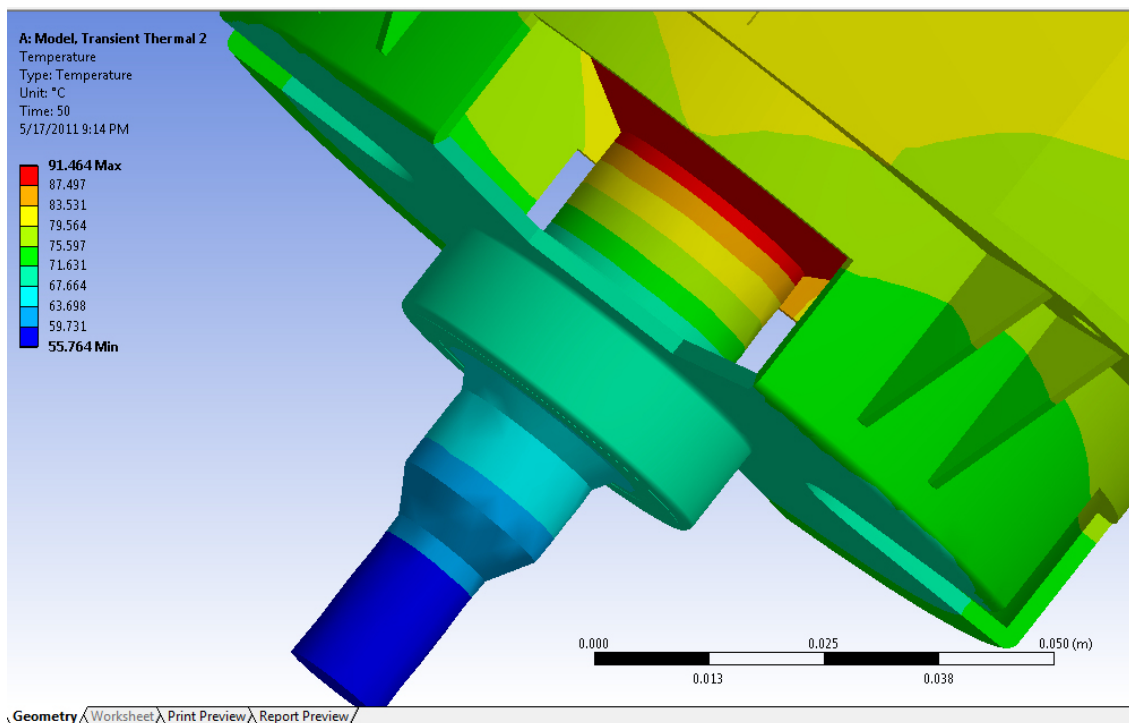
Notice: \* link to PDF file

ELECTRICAL DESIGN: 899.40110.57 A ( 186 c.  $\phi$  0.8 , 2x2x11 c.  $\phi$  0.63 )

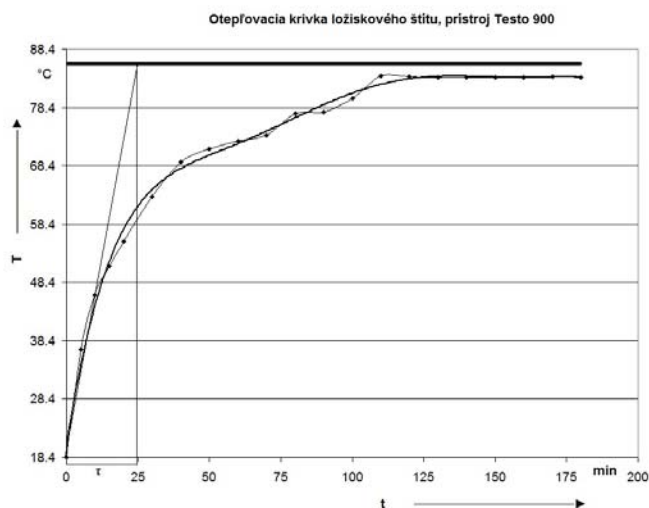
Obr. 11 - Základné vlastnosti v angličtine poskytnuté závodom BSH Michalovce



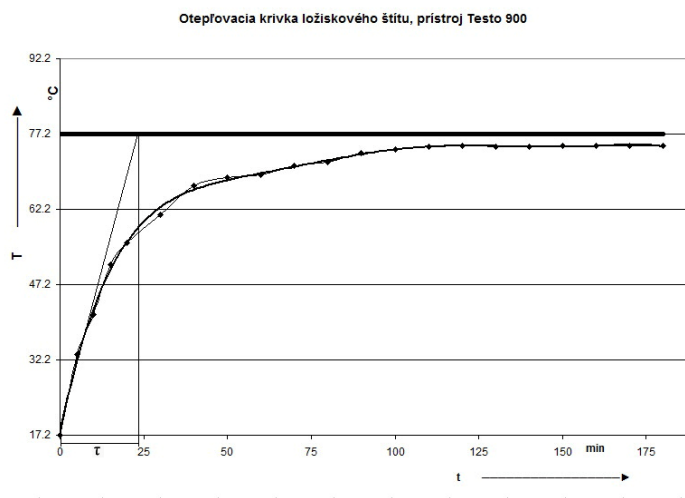
Obr. 12 - Teplotný model elektromotoru Muster z boku



**Obr. 12** - Detail rozloženia teploty na hriadieli teplotného modelu elektromotora Muster



**Obr. 13** - Otepľovacia krivka ložiskového štítu so zostrojenou časovou konštantou, prístroj Testo 900, meranie č. 1



**Obr. 14** - Otepľovacia krivka ložiskového štítu so zostrojenou časovou konštantou, prístroj Testo 900, meranie č. 2